

УДК 621.18:658.26

КП

№ госрегистрации 0110U001150

Інв.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
СУМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

40007, г. Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2, тел. (0542) 33 41 08
факс (0542) 33 40 58

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
д.ф-м.н., профессор
_____ А.Н. Черноус

О Т Ч Е Т

по научно-исследовательской работе

**"Разработка струйного понижающего термотрансформатора для систем
эффективного теплоснабжения коммунальных хозяйств Украины"**

(промежуточный)

Начальник НИЧ,
к.т.н., доцент

В.А.Осипов

Руководитель НИР,
к.т.н., доцент

С.М. Ванеев

Сумы – 2010

Рукопись закончена 20.12. 2010 года

Результаты работы рассмотрены на научном совете СумГУ
протокол № 6 от 23.12.2010

СПИСОК АВТОРОВ

Руководитель НИР

Ведущий научный сотрудник

к.т.н., доцент

Старший научный сотрудник

к.т.н., профессор

Научный сотрудник

Младший научный

сотрудник

С.М. Ванеев

(Все разделы)

Арсеньев В.М.

(Раздел 1, 2)

М.Г. Прокопов

(Раздел 3, 4)

Е.А. Вертепова

(Раздел 3)

РЕФЕРАТ

Отчет по НИР: 67 с., 15 рис., 4 табл., 10 ист.

Объекты исследования – рабочий процесс струйного термокомпрессора в составе понижающего термотрансформатора для ресурсосберегающего теплоснабжения коммунальных и промышленных предприятий.

Цель работы – разработка методик расчета и проектирования понижающего термотрансформатора со струйным термокомпрессорным модулем.

Методы исследования – теоретические методы (термодинамический анализ, теплофизическое моделирование), вычислительный эксперимент.

На основе проведенного термодинамического анализа разработан новый комбинированный цикл понижающего термотрансформатора, обеспечивающий эффективное преобразование подводимой энергии (преимущественно в форме тепла топлива) в поток теплоносителя системы теплоснабжения с необходимым температурным уровнем (50...90°C).

Подготовлена и апробирована программа численного исследования рабочего процесса понижающего термотрансформатора на базе которой проведены многовариантные расчеты.

На основе расчетных исследований установлена область достижимых показателей предлагаемой системы теплоснабжения; определена область исходных режимных параметров, соответствующая максимальным значениям коэффициента преобразования и эксергетической эффективности; получены сравнительные показатели основных параметров исследуемого термотрансформатора на различных рабочих веществах в диапазоне режимов работы в качестве теплового насоса или холодильной машины.

Ключевые слова: РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС, СТРУЙНЫЙ ТЕРМОКОМПРЕССОР, ПОНИЖАЮЩИЙ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОР, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
Перечень обозначений	5
Введение	6
1 Тепловая схема и термодинамический анализ цикла	
струйного понижающего термотрансформатора	9
1.1 Способы энергосберегающего теплоснабжения	9
1.2 Принцип действия струйного понижающего термотрансформатора	12
1.3 Анализ эффективности струйного понижающего	
термотрансформатора	15
2 Моделирование рабочего процесса и установление рациональных	
параметров модуля струйного термокомпрессора (СТК)	18
2.1 Описание термодинамической модели	18
2.2 Рациональные параметры модуля СТК	22
3 Численный анализ и выбор рабочего вещества циркуляционного	
контура термотрансформатора	24
3.1 Критерии энергоэффективности	24
3.2 Расчеты энергоэффективности термотрансформатора	25
3.3 Сравнительный анализ	28
3.4 Расчеты термотрансформатора в режиме ХМ	29
4 Методика расчета параметров рабочего процесса	
термотрансформатора	33
4.1 Алгоритм расчета	33
4.2 Программный комплекс	39
4.3 Показатели комбинированного цикла	40
Выводы	45
Список литературы	46
Приложение А	47
Приложение Б	63

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

d, l – диаметр и длина, удельная работа, м, Дж/кг;
 F – площадь сечения, теплообмена, м²;
 f – относительная площадь сечения;
 α_e^o – угол конуса канала сопла;
 z – продольная координата, м;
 t, T – температура, °С, К;
 p – статическое давление, Па;
 v – удельный объем среды, м³/кг;
 e – удельная эксергия, Дж/кг;
 h – энтальпия, Дж/кг;
 s – энтропия, Дж/(кг·К);
 τ – время, с;
 τ_w – касательное напряжение на стенке, Па;
 w – средняя скорость течения, м/с;
 a_* – критическая скорость, м/с;
 x – массовое паросодержание;
 β – объемное паросодержание;
 u – коэффициент инжекции;
 \dot{m}, m – массовый расход, масса, кг/с, кг;
 Re – критерий Рейнольдса;
 Nu – число Нуссельта.
 n – число труб в ряду секции теплообмена;
 θ – температурный напор;
 Δ – шероховатость поверхности, мм;
 γ – степень рециркуляции;
 Q – тепловая мощность, Вт;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 G – расход топочных газов в секции теплообмена, кг/с.

Индексы:

f – расходное сечение; a – выходной срез канала; n – противодавление; o – параметры торможения; (*) – критическое сечение (параметр); n – пар; $ж$ – жидкость; $г$ – топочные газы; $в$ – воздух.

ВВЕДЕНИЕ

Тема энергосбережения для Украины всегда была актуальной, так как собственными энергетическими ресурсами страна обеспечена менее чем на 50%. А сегодня, после существенного повышения Россией цен на природный газ, эта тема стала ещё и модной. Поэтому энергосбережение и экологическая чистота теплоснабжения объектов коммунальных и промышленных предприятий являются важнейшими проблемами современной экономики.

Относительная дешевизна и доступность высококалорийных углеводородных топлив (в первую очередь природного газа) за последние десятилетия привели к массовому сжиганию их в топках котельных агрегатов с целью производства низкопотенциального тепла (в Украине около 70% общего потребления). В условиях разрастающегося энергетического кризиса и непрерывного роста цен на топливо реализация такого энергозатратного теплоснабжения является крайне нерациональным и расточительным способом использования ценных энергоресурсов, что расценивается в настоящее время как «признак технической отсталости» [1].

С позиции законов термодинамики, основная задача теплоснабжения, например, отопления, заключается в компенсации необратимых потерь тепла через изолирующие поверхности в окружающую среду путем подвода необходимого теплового потока Q (Вт), состоящего из смеси эксергии E_q (превратимая энергия) и анергии A_q (энергия теплоносителя при температуре равной температуре окружающей среды $T_{o.c}$ и поэтому не являющаяся эксергией):

$$Q = E_q + A_q.$$

При этом, в зависимости от методов формирования требуемого количества анергии A_q , существует несколько принципиально различных возможностей создания греющего теплового потока Q .

Широко применяемый в настоящее время традиционный способ заключается в том, что берут поток чистой эксергии E_l (например, химическую

энергию топлива, электрическую, механическую или энергию какого-либо физического поля) и создают из него греющий тепловой поток: $E_I \geq Q_I$. Таким образом, необходимая для нагрева энергия A_q , имеющаяся в наличии в неограниченном количестве (энергия окружающей среды), в данном случае «производится» из первичной ценной эксергии E_I . К таким энергозатратным устройствам относятся водогрейные котлы, электронагреватели, гидравлические теплогенераторы и многие другие теплотехнологические системы.

Так как необходимая для нагрева теплоносителя отопления эксергия E_q составляет обычно лишь малую часть потока Q , то степень энергоэффективности таких систем крайне низкая.

$$\eta_e = (E_q / E_I) = \eta_q \cdot (1 - (T_{o.c.} / \tilde{T}_1))$$

где η_q – коэффициент теплоиспользования (т. н. энергетический к.п.д. котельного агрегата, учитывающий только прямые потери при передаче энергии E_I в форме тепла: «излучение» от корпуса, потери с выхлопными газами, химический и механический недожог и т.д.);

\tilde{T}_1 – средняя температура теплоносителя (нагреваемого потока) в процессе передачи энергии.

Данная расчетная зависимость не учитывает (обычно принимаемое условие в современной теплоэнергетике) незначительное различие между удельной эксергией e_T и теплотворной способностью q_n топлива.

Согласно зависимости, например, при нагреве оборотной воды отопления от 30 до 70°C и характерных значениях определяющих параметров $\eta_q = 0,8 \dots 0,9$ и $T_{o.c.} = 263 \dots 273\text{K}$ степень энергоэффективности теплоснабжения $\eta_e = 0,12 \dots 0,15$. Следовательно, в данном случае около 90% подводимой энергии топлива E_I , по – сути, выбрасывается в окружающую среду.

С позиции экономической целесообразности, традиционный способ может быть «оправдан» только лишь низкой стоимостью топлива и простотой конструкции водогрейных котлов.

Практическое решение проблемы может быть достигнуто в результате разработки перспективных методов термотрансформации низкопотенциального тепла и создания на их основе энергоэффективных систем теплоснабжения. Разработка эффективной струйной термокомпрессорной установки для энергосберегающих систем отопления требует оценки влияния различных факторов на энергоэффективные показатели, что позволит перейти к оптимальному проектированию.

1 ТЕПЛОВАЯ СХЕМА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛА СТРУЙНОГО ПОНИЖАЮЩЕГО ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА

1.1 Способы энергосберегающего теплоснабжения

1. Основанный на реализации прямых циклов, способ «вертикальной» когенерации представляет совместное производство нескольких различных потоков энергии (чаще всего электроэнергии и низкопотенциального тепла, например, в ТЭЦ) при условии подвода энергии топлива E_1 только к верхнему высокотемпературному циклу [3]. Следовательно, необходимая для теплоснабжения анергия A_q здесь формируется на стадии подвода энергии E_1 в парогенераторе и передается с потоком бросового тепла Q прямого цикла. За счет повышения температуры \tilde{T}_1 верхнего цикла, в существующих когенерационных энергоустановках значительно увеличена, по сравнению с традиционным котельным отоплением, общая степень энергоэффективности: обычно до 30...40% и выше. Основной недостаток, обусловленный потерями тепла при транспортировке от крупных энергоблоков, устраняется расширением децентрализации – применением малых локальных когенерационных систем энергоснабжения. Следует отметить, что реализация принципа струйной термокомпрессии в малой паротурбинной энергоустановке (мини-ТЭЦ) с новым компрессорным циклом преобразования энергии [4] позволяет существенно снизить потери в процессе подвода энергии топлива E_1 , доминирующие в традиционных паротурбинных установках.

2. Основанный на реализации обратных циклов, второй энергоэффективный способ предполагает формирование греющего теплового потока Q из минимального количества необходимой эксергии $E_1 = E_q + \Delta E_1$ (ΔE_1 – потери за счет необратимости цикла) и анергии A_q , отбираемой из окружающей среды без дополнительных затрат. Этот способ реализуется в

повышающем термотрансформаторе (т.н. тепловом насосе) [5]. Основным недостатком тепловых насосов является относительно низкая экономическая эффективность из-за необходимости использования для привода, например, в наиболее распространенных парокомпрессорных установках, механической (или электрической) энергии. Техничко-экономическое обоснование, проводимое при сопоставлении традиционного котельного теплоснабжения с теплонасосным, показывает, что из-за существенной разницы между стоимостью электроэнергии и топлива (обычно природного газа или угля) намного более высокая энергетическая эффективность тепловых насосов не покрывает эксплуатационные затраты по электроэнергии и, тем более, – капитальные затраты на создание теплонасосных систем.

3. Указанная проблема в значительной степени устраняется в т.н. понижающих термотрансформаторах, в которых сочетается совместная реализация прямого и обратного циклов (комбинированный способ теплоснабжения). По конечному термодинамическому эффекту в данном случае становится возможным получение большего количества греющего низкопотенциального тепла Q при подводе значительно меньшего количества энергии E_I также в форме тепла (например, тепла Q_I сжигаемого топлива) к прямому циклу (рис. 1.1). Здесь механическая работа L_I прямого цикла I используется в обратном цикле II теплового насоса для трансформации энергии A_q'' из окружающей среды. Вместе с бросовой теплотой прямого цикла Q' трансформируемая теплота Q'' обратного цикла формируют греющий тепловой поток $Q = Q' + Q''$ (площадь под кривой процесса (н-к), подводимый к теплоносителю системы отопления с необходимым уровнем эксергии E_q (заштрихованная площадь на рис. 1.1).

Величина коэффициента преобразования (Q/Q_I) комбинированного цикла понижающего термотрансформатора, с учетом потерь тепла при передаче подводимой энергии E_I , определяется значениями внутреннего к.п.д. η_i прямого и холодильного коэффициента ε_x обратного циклов.

$$\Psi_q = \eta_q \cdot (1 + \eta_i \cdot \varepsilon_x) \quad (1.1)$$

Коэффициент преобразования Ψ_q всегда больше единицы (например, при характерных значениях определяющих параметров $\eta_q = 0,9$, $\eta_i = 0,4$, $\varepsilon_x = 3,5$ величина $\Psi_q = 2,2$).

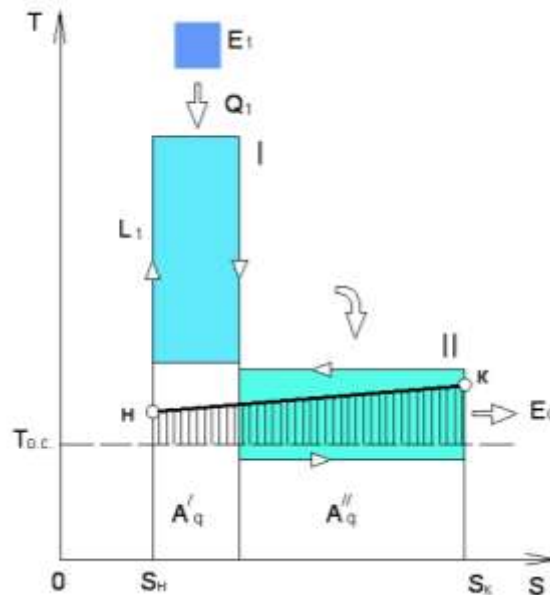


Рисунок 1.1 – Принципиальное представление комбинированного цикла понижающего термотрансформатора в тепловой диаграмме состояния

Использование отдельных энергоустановок (теплового двигателя и теплового насоса) для создания понижающего термотрансформатора требует сравнительно высоких капитальных затрат и продолжительных сроков окупаемости. В связи с этим, особый интерес представляют установки, которые, по-сути, объединяют в одном агрегате тепловую и холодильную машины: абсорбционные (термохимические) и парожеторные термотрансформаторы. В существующих абсорбционных бромистолитиевых установках достигнуты умеренные значения коэффициента преобразования $\Psi_q = 1,5-1,7$ [6]. Возможность же применения эжекторных установок, работающих в качестве понижающего трансформатора, в настоящее время не обсуждается в связи с их крайне низкой энергетической эффективностью.

Энергоэффективность понижающего термотрансформатора может быть существенно повышена, как следует из зависимости (1.1), за счет

совершенствования процесса преобразования подводимой энергии E_1 и, соответственно, – увеличения к.п.д. η_i прямого цикла.

1.2 Принцип действия струйного понижающего термотрансформатора

В рассматриваемой установке (рис. 1.2) комбинирование прямого и обратного циклов обеспечивается применением струйного термокомпрессорного модуля (СТК), в циркуляционном контуре которого реализуется правосторонний цикл (*К-С-Н-П-К*) преобразования энергии. Обратный пароконпрессорный цикл (01-03-04-02-01) термотрансформатора сочетается с прямым в процессе сжатия пара (02-01) в струйном компрессоре.

Рабочий процесс СТК предполагает использование в качестве активной среды вскипающую при истечении недогретую до насыщения жидкость [2]: в выходном сечении активного сопла компрессора (*К*) формируется сверхзвуковая струя мелкодисперсной парокапельной структуры с высоким объемным паросодержанием ($\beta_a \rightarrow 1$) [7]. Эта струя инжектирует перекачиваемый пар из испарителя ИС. Сжатый в струйном компрессоре влажный пар разделяется в сепараторе (*С*) на два потока: сухой насыщенный пар подается в конденсатор теплоснабжения КД, а насыщенная жидкость отбирается насосом (*Н*) в циркуляционный контур и после нагрева в подогревателе (*п*) нагнетается в компрессор для формирования рабочей струи.

В охладителе конденсата ОК (рис. 1.3) происходит охлаждение жидкого хладагента ниже температуры конденсации (переохлаждение). При конденсации и последующем охлаждении пар отдает свое тепло воде, циркулирующей в отопительной системе. Нагретая жидкость поступает по трубам к отопительным батареям, которые и нагревают воздух внутри помещений. Движение воды в отопительном контуре осуществляется с помощью циркуляционного насоса Н1.

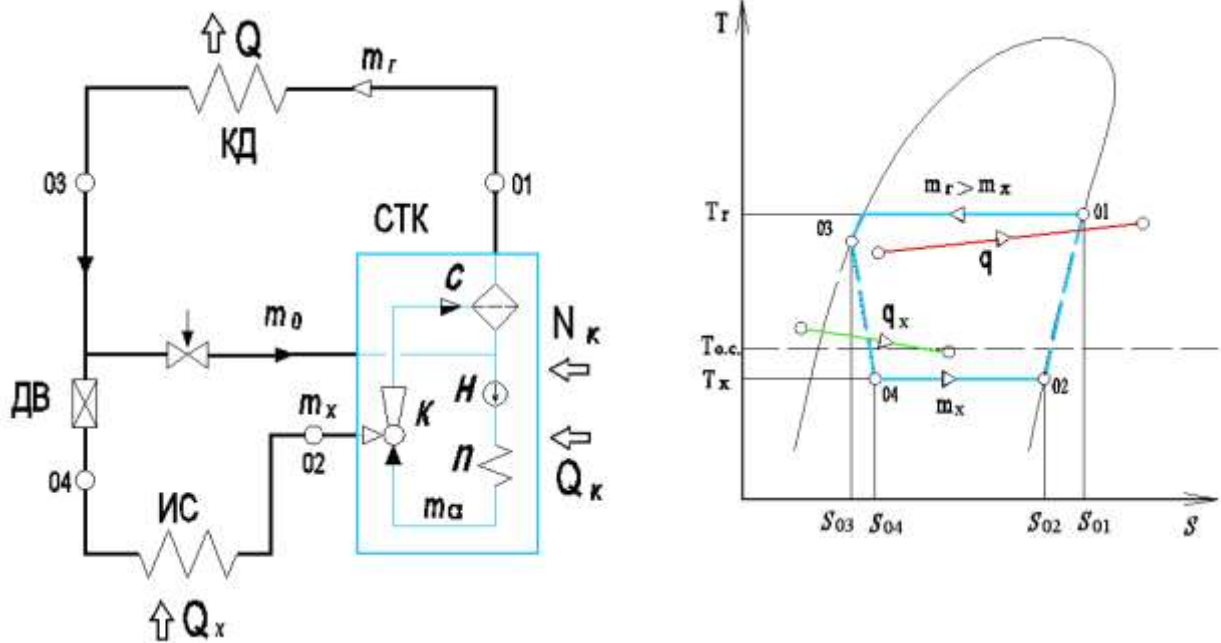


Рисунок 1.2 – Тепловая схема и цикл понижающего термотрансформатора на базе струйного термокомпрессора:

КД – конденсатор теплоснабжения; ДВ – дроссельный вентиль;
 ИС – испаритель; СТК – струйный термокомпрессор (c , n , p , k – сепаратор жидкой фазы, циркуляционный насос, подогреватель жидкости, струйный жидкостно-паровой компрессор)

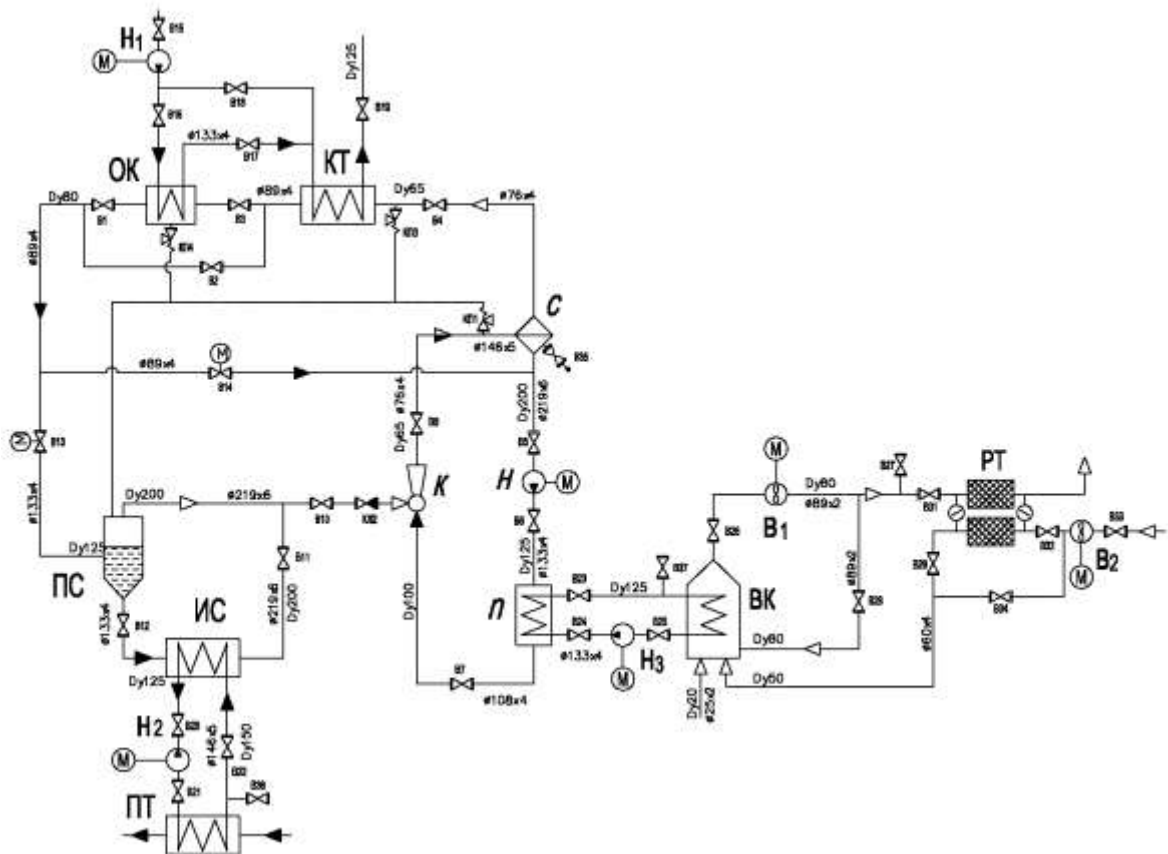


Рисунок 1.3 – Принципиальная тепловая схема термотрансформатора

Образовавшийся охлажденный конденсат рабочего тела направляется на дроссельный вентиль, где дросселируется с понижением давления от p_{03} до p_{04} . После дроссельного вентиля влажный пар поступает в промсосуд для разделения на сухой насыщенный пар и жидкость. Жидкое рабочее тело поступает в испаритель. За счет теплоты источника с низкой температурой (сточных вод) в испарителе происходит процесс парообразования фреона. Полученный пар смешивается с отделенным в промсосуде и направляется в компрессор.

Назначением водогрейного котла ВК является производство горячей воды, для нагрева жидкого R-142. В котле химическая энергия топлива при его сжигании в виде теплоты передается воде, циркуляция которой в контуре подогреватель-водогрейный котел осуществляется применением насоса НЗ. Вытяжка продуктов сгорания осуществляются вентилятором В1. Часть вышедших газов поступает обратно в камеру сгорания, а часть – в регенеративный теплообменник РТ, где подаваемый вентилятором В2, воздух нагревается.

Трубопроводы установки снабжены запорной арматурой для перекрытия трубопроводов (шаровые краны), запорно-невозвратной – для пропуска среды в одном направлении и запирающая в обратном (обратные клапаны), предохранительной – для сброса избытка давления (предохранительные клапаны).

Во время нормальной работы установки вентили В2, В18, В27, В34 закрыты.

Для отключения оборудования (например, при ремонте) предусмотрены вентили В1, В3-В17, В19-В26, В28-В29, В31-В33. В случае ремонта охладителя конденсата систему можно не останавливать: необходимо перекрыть вентили В1, В3, В16, В17 и открыть В2, В18. Аналогично при отключении регенеративного теплообменника нужно перекрыть вентили В29, В31, В32 и открыть вентили В27, В34. Во всех остальных случаях установку останавливают и оборудование отсекают вентилями.

Возможное некоторое перепроизводство сжатого пара $\Delta m_o = (m_r - m_x)$ за счет внутренних диссипативных процессов компенсируется отбором части жидкости $\Delta m_o = (m_r - m_x)$ в циркуляционный контур посредством вентиля В14.

Для предотвращения перетечек рабочей среды из области высокого давления в область низкого давления (например в случае поломки насоса) предусмотрен обратный клапан КЛ1.

Для автоматического выпуска среды из системы высокого давления в систему низкого давления, обеспечения безопасной эксплуатации установок и предотвращения аварий установлен предохранительный клапан КЛ2.

Для заправки установки фреоном предусмотрен вентиль В35, для заправки контура испаритель-промежуточный теплообменник водой – вентиль В36, для заправки контура подогреватель-водогрейный котел – вентиль В37.

Таким образом, применение термокомпрессорного модуля вместо традиционного механического компрессора в известном пароконпрессорном тепловом насосе позволяет реализовать новый комбинированный цикл понижающего термотрансформатора струйного типа, обеспечивающий возможность замены ценной электрической энергии на привод низкопотенциальной теплотой.

1.3 Анализ эффективности струйного понижающего термотрансформатора

Следует отметить, что основная отличительная особенность рассматриваемой установки связана с организацией нового способа передачи энергии E_l в форме тепла Q_k и механической мощности N_k к прямому циклу.

Приращение полной энтальпии жидкости в циркуляционном контуре за счет подвода энергии в форме теплового потока Q_k (Вт) и механической мощности N_k (Вт) насоса расходуется на формирование рабочей струи в

компрессоре (κ) с необходимым уровнем кинетической энергии ($m_\alpha \cdot w_\alpha^2/2$), согласно I закону для поточного процесса:

$$Q_\kappa + N_\kappa = (h_{o\alpha} - h'_c) \dot{m}_\alpha, \quad (1.3)$$

где $h_{o\alpha}$ – энтальпия жидкости на выходе из подогревателя (n), Дж/кг;

h'_c – энтальпия насыщенной жидкости в сепараторе (c), Дж/кг;

\dot{m}_α – производительность циркуляционного насоса (n), кг/с;

w_α – скорость истечения вскипающей жидкости из активного сопла, м/с.

Экспериментальными и расчетными исследованиями [8], установлена область существования режимных и геометрических параметров с максимально высокими значениями коэффициентов скорости истечения $\varphi_\alpha = 0,96-0,98$ и импульса $\varphi_i \approx 1,0$ (появление режимов с $\varphi_i > 1,0$ связано с метастабильностью истечения вскипающей жидкости). Причем, данные испытаний опытных образцов СТК на водяном паре свидетельствуют об отсутствии предельных критических режимов в приемной камере, которые существенно ограничивают эффективность газо- или пароструйных компрессоров (или эжекторов) из-за сопутствующих потерь «на удар» [9]. Эта особенность объясняется более высоким уровнем значений скорости звука $a_{л*}$ в инжектируемом потоке сухого или маловлажного насыщенного пара по сравнению с величиной скорости истечения w_α двухфазного потока в районе нижней пограничной кривой.

Отмеченные преимущества рабочего процесса струйного термокомпрессора, возможность осуществления адиабатного процесса сжатия пара (02-01) вдоль правой пограничной кривой (рис. 1.2) и незначительная величина работы насоса циркуляционного контура из-за малости удельного объема жидкости ($\nu'_c \approx 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$) определяют повышенный уровень внутреннего к.п.д. η_i прямого цикла термотрансформатора.

Степень совершенства традиционного способа передачи химической энергии топлива E_I путем нагрева рабочего вещества в поточном процессе с

целью повышения только термической эксергии определяется уровнем средней температуры \tilde{T}_1 этого вещества, входящей в т.н. фактор Карно. Именно этот факт, как уже отмечалось при анализе традиционного способа теплоснабжения, обуславливает высокий уровень потерь и перерасход подводимой энергии (топлива) в теплотехнических системах.

Подводимая энергия E_I в рассматриваемом термотрансформаторе затрачивается в СТК на компремирование и восстановление параметров «отработавшего» пара (состояние (02)) до рабочего состояния (01) (рис. 1.2). В соответствие с этим, степень совершенства передачи энергии E_I здесь равна эффективному к.п.д. СТК, который, как и для любого механического компрессора, равен отношению приращения эксергии сжимаемого и перемещаемого газа (пара) к подводимой на привод энергии E_I :

$$\eta_{e\text{СТК}} = \frac{m_x \cdot (e_{o1} - e_{o2}) + m_o \cdot (e_{o1} - e_{o3})}{\eta_q^{-1} \cdot Q_\kappa + \eta_m^{-1} \cdot N_\kappa} \quad (1.4)$$

где e_j – удельная эксергия пара в j -ой точке, (Дж/кг);

η_m – механический (электрический) к.п.д. насоса циркуляционного контура.

По данным исследований, представленных в работе [4], величина к.п.д. $\eta_{e\text{СТК}}$ составляет обычно 0,5-0,8 и в значительно меньшей степени зависит от уровня температуры рабочей воды в нагревателе.

Следовательно, объединение, по-сути, отдельных процессов сжатия и подвода энергии в форме тепла в прямом цикле, реализуемом в термотрансформаторе, приводит к качественно новому результату – существенному повышению эффективности преобразования энергии. В данном случае известный фактор Карно уже не является критерием, определяющим степень совершенства передачи энергии E_I в цикл.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И УСТАНОВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯ СТРУЙНОГО ТЕРМОКОМПРЕССОРА (СТК)

2.1 Описание термодинамической модели

Для определения параметров тепловой схемы и характеристик энергетического оборудования понижающего термотрансформатора необходимы сведения об эффективных показателях термодинамического цикла и влиянии на них различных определяющих факторов. Для решения этой задачи составлена термодинамическая модель.

В основе термодинамической модели рабочего процесса положены следующие положения и допущения:

1. Течение одномерное;
2. В силу высокой интенсивности обменных процессов в турбулентном потоке кипящей жидкости скольжение фаз в осредненном движении отсутствует, т.е. $w_{жс} = w_{л}$;
3. За счет определенной незавершенности парообразования и межфазного теплообмена поток характеризуется термической метастабильностью, когда $t_{жс} > t_s(p)$;
4. Уравнение состояния рабочей среды для областей жидкости и сухого пара используется в табличной форме.

Специфика метода заключается в том, что замыкание системы уравнений поточного процесса (сохранения массы, количества движения, энергии, метастабильного состояния квазисплошной среды и производства энтропии) из-за невозможности применения для расчета двухфазных течений известной теории газодинамических функций осуществляется введением дополнительных соотношений по дисперсности жидкой фазы, кинетике фазовых переходов и критическим режимам [4].

В основу термодинамической модели рабочего процесса положены следующие уравнения:

1. Уравнение состояния двухфазной среды, отражающее функциональную связь между основными термодинамическими параметрами состояния термодинамической системы:

$$\nu = \nu_{ж}(t_{ж}) + x \cdot (\nu_{п}(t_{п}, p) - \nu_{ж}(t_{ж})) \quad (2.1)$$

где $\nu_{ж}, \nu_{п}$ – удельный объем жидкости и пара соответственно;

x – массовое расходное паросодержание.

2. Уравнение сохранения массы, согласно которому массовый расход среды во времени постоянен:

$$d\left(\frac{w(z) \cdot F(z)}{\nu}\right) = 0, \quad (2.2)$$

где $w(z)$ – скорость течения;

$F(z)$ – площадь сечения.

3. Уравнение фазового перехода показывает степень завершенности фазового перехода:

$$dx = \kappa(z) \cdot (\nu/w(z)) dz, \quad (2.3)$$

где $\kappa(z)$ – скорость фазового перехода.

4. Уравнение сохранения полной энтальпии или I закон термодинамики, согласно которому сумма всех видов энергии является величиной постоянной:

$$d\left(h_{ж}(t_{ж})x \cdot (h_{п}(t_{п}, p) - h_{ж}(t_{ж})) + \frac{w^2(z)}{2}\right), \quad (2.4)$$

где $h_{ж}(t_{ж}), h_{п}(t_{п}, p)$ – энтальпия жидкости и пара соответственно.

5. Уравнение сохранения количества движения (импульсов) или закон сохранения механической энергии:

$$d(m_1 \cdot w_1(z) - m_2 \cdot w_2(z)) = -F(z) \cdot dp - \tau \cdot \Pi(z) \cdot dz \quad (2.5)$$

где $\Pi(z)$ – периметр сечения;

τ – касательное напряжение на стенке.

6. Уравнение производства энтропии, согласно которому любые реальные процессы в природе протекают неравновесно, необратимо, т.е. всегда сопровождаются диссипацией энергии:

$$d\left(s_{ж}(t_{ж}) + x \cdot (s_{п}(t_{п}, p) - s_{ж}(t_{ж}))\right) > 0, \quad (2.6)$$

где $s_{ж}(t_{ж}), s_{п}(t_{п}, p)$ – энтропия жидкости и пара соответственно.

Диссипация энергии в турбулентном потоке влажного пара мелкодисперсной структуры, обусловленная трением в пограничном слое и термической метастабильностью дискретной жидкой фазы, учитывается скоростными коэффициентами проточных частей.

7. Уравнение кинетики фазового перехода для i -той группы капель, показывающее за счет чего происходит фазовый переход:

$$-(h_{п}(t_{п}, p) - h_{ж}(t_{жи})) \cdot dm_i = \alpha_i \cdot \pi \cdot a_i^2 \cdot (t_{ж} - t_{п}) \cdot d\tau, \quad (2.7)$$

где α_i – коэффициент теплоотдачи;

a_i – размер капель жидкости i -той группы;

τ – время.

8. Уравнение статистического распределения по размерам капель жидкости:

$$a_i = a_v \cdot \left(\ln(1 - \delta_i)^{-1}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.8)$$

где a_v – средний размер капель жидкости;

δ_i – относительный объем.

Уравнения 2.3, 2.7, 2.8 учитывается в случае малых размеров контрольного пространства, когда система не успевает прийти в равновесие.

Анализ критических режимов течения производится на основе зависимости для расчета скорости звука в двухфазной среде:

$$a_*^2 = k_n \cdot p \cdot v \cdot \beta^{-1},$$

где k_n – показатель изоэнтропы пара;

β – объемное расходное паросодержание.

$$\beta = \frac{x \cdot v_{\Pi}(t_{\Pi_b}, p)}{v}.$$

Данные уравнения дополняются зависимостями для расчета геометрии канала $f(f, \bar{z})$, касательного напряжения на стенке, коэффициентов и показателей эффективности.

Основные коэффициенты струйного понижающего термотрансформатора:

1. Относительный вклад механической составляющей в общем балансе подводимой энергии:

$$\alpha_N = \frac{N_{\kappa}}{Q_{\kappa} + N_{\kappa}}.$$

2. Массовый коэффициент инжекции – отношение массового расхода инжектируемого потока к массовому расходу рабочего потока:

$$U = \frac{m_x}{m_a}.$$

3. Относительный недогрев:

$$(1 - \varepsilon_{so}) = 1 - \frac{P_{so}}{P_{oa}}.$$

Основные показатели эффективности струйного понижающего термотрансформатора:

1. Коэффициент преобразования, показывающий во сколько раз больше тепла установка передает в отопительную систему, чем затрачивается энергия (см. формулу 1.1);

2. Эффективный к.п.д. СТК, т.е. степень совершенства передачи энергии (см. формулу 1.4);

3. Эффективный к.п.д. термотрансформатора – степень термодинамического совершенства цикла, характеризующая степень обратимости протекающего процесса:

$$\eta_e = \frac{E_q}{E_1} = \frac{m_{\Gamma} \cdot (e_{o1} - e_{o3})}{\eta_q^{-1} \cdot Q_{\kappa} + \eta_m^{-1} \cdot N_{\kappa}}. \quad (2.9)$$

2.2 Рациональные параметры модуля СТК

По данным испытаний СТК на водяном паре установлены следующие численные значения скоростных коэффициентов: активного сопла $\varphi_a = 0,95 \dots 0,98$, пассивного (кольцевого) сопла $\varphi_n = 0,93 \dots 0,95$, камеры смешения $\varphi_k = 0,91 \dots 0,92$, диффузора $\varphi_D = 0,87 \dots 0,90$. В качестве используемого в термотрансформаторе рабочего вещества принят известный хладон R-142; выбор рабочего тела не является принципиальным в связи с близостью термодинамических и термофизических свойств известного перечня веществ, принимаемых в тепловых насосах, включая современные R-236 *fa*, R-245 *fa* и др.

Исследуемый диапазон определяющих параметров комбинированного цикла указан в таблице 2.1. В качестве исходных данных приняты следующие численные характеристики оборудования:

- внутренний к.п.д. циркуляционного насоса $\eta_n = 0,8$;
- механический к.п.д. насоса $\eta_m = 0,9$;
- коэффициент теплоиспользования подогревателя рабочей жидкости $\eta_q = 0,95$;
- коэффициенты скорости струйного компрессора $\varphi_a = 0,97$ (кроме серии дополнительных расчетов), $\varphi_n = 0,95$; $\varphi_k = 0,92$; $\varphi_D = 0,90$.

Таблица 2.1 – Диапазон изменения определяющих факторов

Показатель	Обозначение	Размерность	Численное значение
Рабочие параметры пара в сепараторе (конденсаторе теплоснабжения):			
– температура	$t_{ol} = t_c$	°C	50...100
– давление	$p_{ol} = p_c$	бар	6,9...21,3
Перегрев циркуляционной жидкости в подогревателе	$\Delta t_a = t_{oa} - t_c$	°C	1...6

Продолжение таблицы 2.1

Давление нагнетания циркуляционного насоса	p_{oa}	бар	17...25
Параметры кипения в испарителе: – температура	t_{o2}	°C	-35...10
– давление	p_{o2}	бар	0,3...2,08
Температура переохлажденного конденсата	t_{o3}	°C	45

3 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ И ВЫБОР РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Критерии энергоэффективности

Для определения показателей энергоэффективности термотрансформатора необходимы сведения об эффективных показателях термодинамического цикла и влияния на них различных определяющих факторов. Данная задача решается при помощи программного продукта в основу которого положен метод расчета струйного термокомпрессора. В данном методе используется группа уравнений, описывающих законы термодинамики, а также результаты экспериментальных исследований опытного образца СТК [10]. На основе этих данных а также на базе программного продукта для расчета СТК была разработана методика расчета термотрансформатора на базе струйного термокомпрессора с применением веществ НФС – типа. Данный продукт позволяет определять параметры в характерных точках, а также степень эффективности струйно-термокомпрессорного модуля и самого термотрансформатора. В процессе численного эксперимента предварительно рассчитывается область возможных режимов работы компрессора по числу Маха M_3 во входном сечении диффузора и определяется оптимальное значение относительно скорости M_3 , соответствующее максимуму коэффициента инжекции [4].

Отличительной особенностью данной установки является принципиально новый способ подвода энергии к прямому циклу в виде тепла Q_m и мощности N_n .

Степень совершенства передачи подводимой энергии представляет эффективный КПД СТК

$$\eta_{eCTK} = \frac{m_x \cdot (e_1 - e_4) + m_0 \cdot (e_1 - e_2)}{E_{ТОП} + N_n / \eta_m}$$

где e_j – удельная эксергия пара в j-ой точке, η_m – механический КПД насоса, $E_{ТОП}$ – поток эксергии топлива.

Степень совершенства термотрансформатора

$$\eta_e = \frac{m_e \cdot (e_1 - e_2)}{E_{ТОП} + N_n / \eta_m}.$$

3.2 Расчеты энергоэффективности термотрансформатора

Для определения режимных параметров при расчете в качестве исходных были приняты следующие характеристики оборудования: $\eta_m = 0,9$ – механический к.п.д. насоса; $\eta_n = 0,8$ – внутренний к.п.д. насоса; $\eta_q = 0,95$ – коэффициент теплоиспользования подогревателя рабочей жидкости; $\phi_a = 0,95-0,98$ – коэффициент скорости струйного компрессора (по экспериментальным данным на водяном паре [10]); $\phi_k = 0,95$ – скоростной коэффициент камеры смешения; $\phi_n = 0,95$ – скоростной коэффициент пассивного потока сопла.

Диапазон определяющих параметров цикла термотрансформатора: $t_1 = 60 \dots 80^\circ\text{C}$ – температура пара в сепараторе (конденсаторе); $p_1 = 6,313 \dots 26,324$ бар – давление в сепараторе (конденсаторе); $\Delta t_a = 2 \dots 4^\circ\text{C}$ – перегрев циркуляционной жидкости в теплообменнике-подогревателе; $p_{0a} = 15 \dots 30$ бар – давление нагнетания насоса; $t_4 = -10 \dots 10^\circ\text{C}$ – температура кипения в испарителе; $t_2 = 35 \dots 50^\circ\text{C}$ – температура переохлажденного конденсата.

Результаты расчета представлены в виде графиков (рисунки 3.1-3.4).

На рисунке 3.1 и 3.2 представлены результаты расчета к.п.д. СТК струйного понижающего термотрансформатора в зависимости от температуры в испарителе t_4 . На рисунке 3.1-а представлены результаты при перегреве в подогревателе $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$ рабочих веществ R142b, R600 показатели которых лучше и R407C показатели которого хуже, а на рисунке 3.1-б при $\Delta t_a = 4^\circ\text{C}$ – R236fa, R134a и R600a. Из графиков видно, что с увеличением перегрева показатели уменьшаются. В свою очередь лучшие показатели достигаются при большей температуре перед КД ($t_1 = 80^\circ\text{C}$) на рабочих веществах R142b и R600, а с ее уменьшением падают, R134a, R407C. На рисунке 3.2 представлены

результаты расчетов при $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$ и $t_l = 60^\circ\text{C}$, где видно характер кривых всех веществ, а также их значения для сравнения.

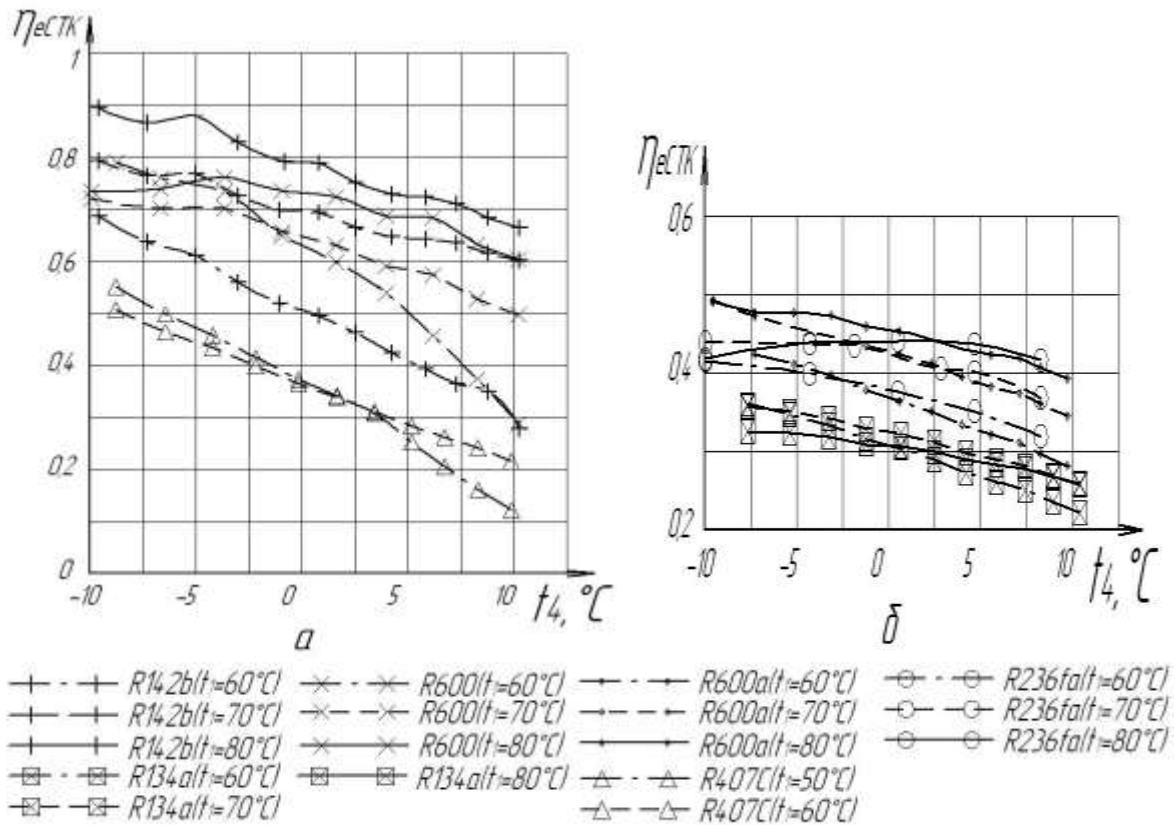


Рисунок 3.1 – Эффективный к.п.д. СТК:
а – при перегреве $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$; б – при перегреве $\Delta t_a = 4^\circ\text{C}$

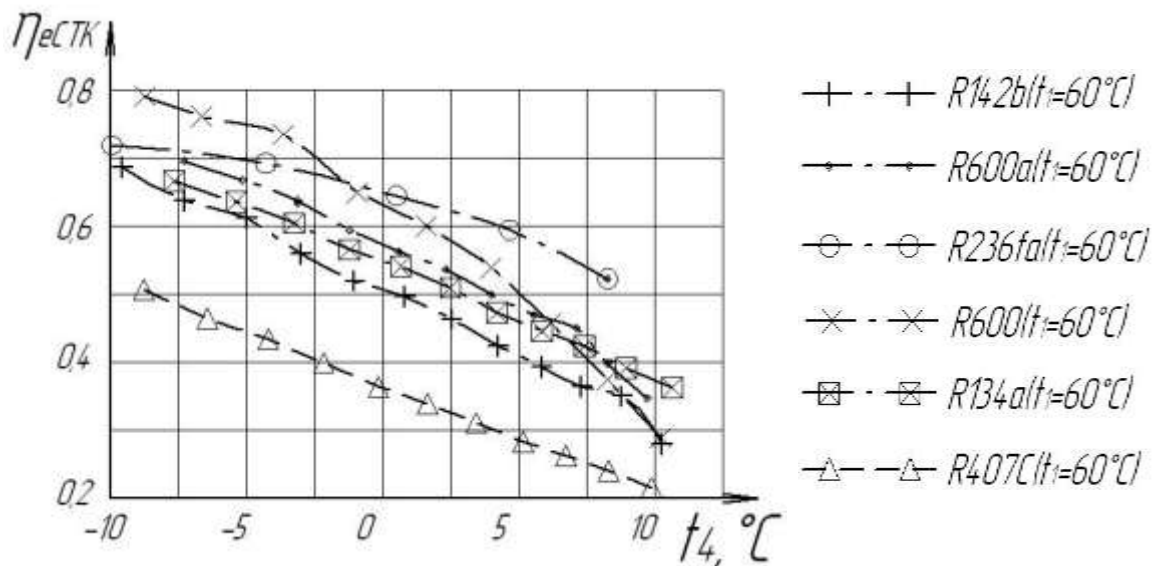


Рисунок 3.2 – Эффективный к.п.д. СТК при перегреве $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$ и $t_l = 60^\circ\text{C}$

Практически аналогичная ситуация наблюдается и для эффективного к.п.д. термотрансформатора (рисунок 3.3). На данном рисунке тоже видно, что при большей температуре перед КД показатели лучше, а для веществ R134a, R407C они хуже. Средние показатели просматриваются у R236fa.

На рисунке 3.4 представлены результаты коэффициента преобразования для перегрева $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$. Как и на предыдущих графиках показатели падают при увеличении перегрева в подогревателе. Из графиков видно, что наилучшие показатели у веществ R142b, R236fa и н-бутана при температуре перед КД $t_l = 70-80^\circ\text{C}$ и перегреве два градуса, где коэффициент преобразования достигает значения 3-3,4. Так же можно отметить показатели R134a R407C, которые достигают 2 и выше. Т.е. можно сделать вывод, что приемлемо использование последних веществ, хоть их показатели хуже, зато они гораздо дешевле по сравнению с рабочими веществами R142b, R236fa, н-бутана и изобутана.

3.3 Сравнительный анализ

Результаты показывают, что энергоэффективность рассматриваемого термотрансформатора существенно зависит от выбора рабочих температур в конденсаторе и в меньшей степени зависит от температуры в испарителе и на выходе из подогревателя, для большинства исследованных рабочих веществ. Для указанных интервалов температур по всем трем показателям энергоэффективности наилучшие результаты имеют место для н-бутана и R142b.

Коэффициент преобразования по полной цепи энергообмена для понижающих термотрансформаторов с применением СТК находится в интервале $\psi = 2,5 \dots 3$, что значительно выше чем рассматриваемые величины для парокomppressorных и теплоиспользующих термотрансформаторов.

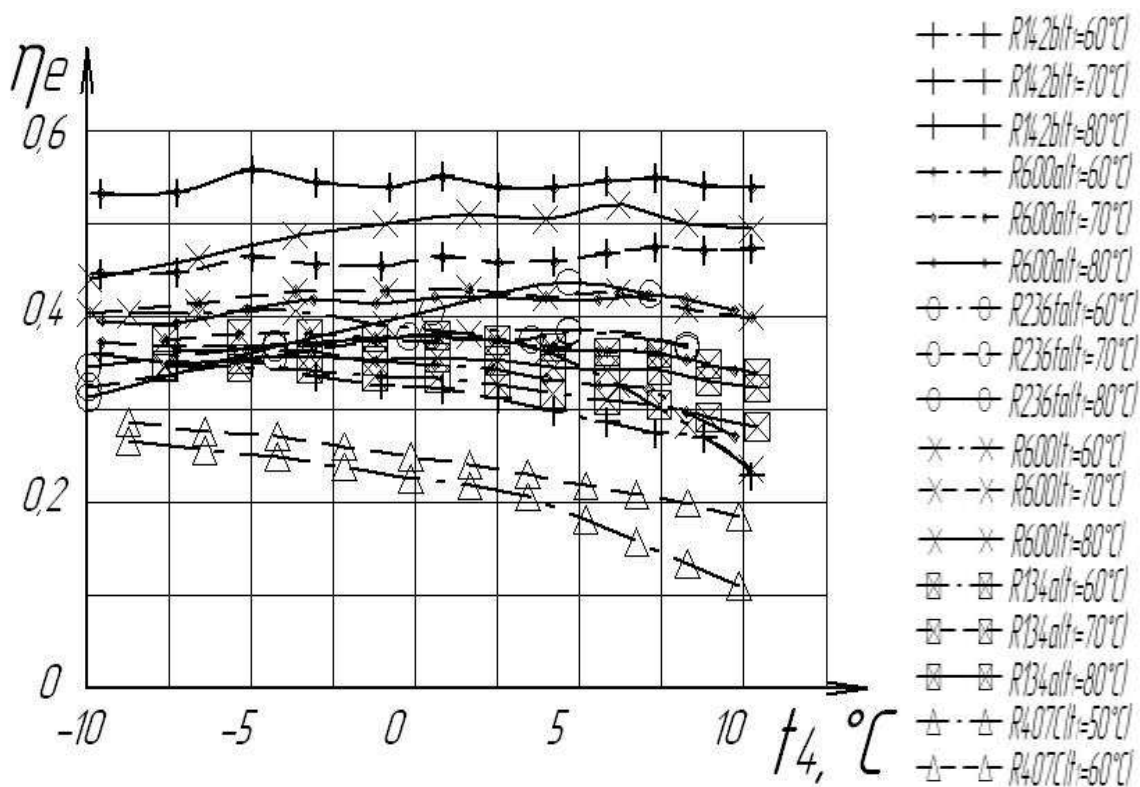


Рисунок 3.3 – Эффективный к.п.д. термотрансформатора при перегреве $\Delta t_a=2^\circ\text{C}$

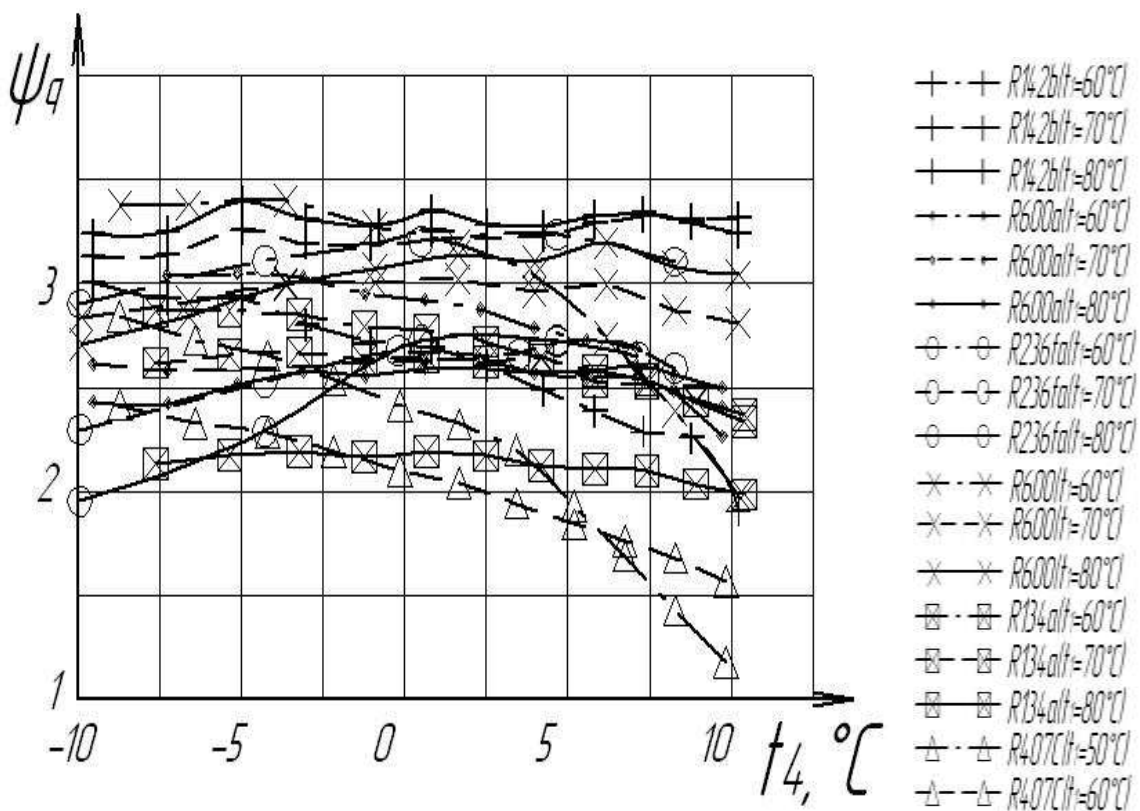


Рисунок 3.4 – Коэффициент преобразования термотрансформатора при перегреве $\Delta t_a=2^\circ\text{C}$

3.4 Расчеты термотрансформатора в режиме ХМ

В качестве показателя энергоэффективности термотрансформатора в режиме холодильной машины используется выражение

$$COP_{\Sigma(TT)} = u \cdot \frac{q_{xm}}{q_a / \eta_{nm} + l_{in} / \eta_{mn}},$$

где u – коэффициент инжекции СТК;

q_{xm} – удельная нагрузка на испаритель И;

q_a – удельная нагрузка на теплообменник Т

l_{in} – удельная работа насоса струйно-компрессорного модуля;

η_{nm}, η_{mn} – коэффициент теплоиспользования подогревателя рабочей жидкости и механический к.п.д. циркуляционного насоса.

В качестве исследуемых веществ были выбраны холодильные агенты R134a и R22. Выбор данных хладагентов обусловлен тем, что на сегодняшний день они являются наиболее используемыми в холодильной технике как отечественных производителей («ОАО» РЕФМА) так и зарубежных (Danfos, Copeland, Bitzer).

Для определения режимных параметров при расчете в качестве исходных были приняты следующие характеристики оборудования: $\eta_m = 0,9$ – механический к.п.д. насоса; $\eta_n = 0,8$ – внутренний к.п.д. насоса; $\eta_q = 0,95$ – коэффициент теплоиспользования подогревателя рабочей жидкости; $\phi_a = 0,95-0,98$ – коэффициент скорости струйного компрессора (по экспериментальным данным на водяном паре [1]); $\phi_k = 0,95$ – скоростной коэффициент камеры смешения; $\phi_n = 0,95$ – скоростной коэффициент пассивного потока сопла.

Диапазон определяющих параметров цикла термотрансформатора: $t_I = 30 \dots 50^\circ\text{C}$ – температура пара в сепараторе (конденсаторе, t_k); $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$ – перегрев циркуляционной жидкости в теплообменнике-подогревателе; $p_{0a} = 15 \dots 20$ бар – давление нагнетания насоса; $t_4 = -20 \dots -10^\circ\text{C}$ – температура кипения в испарителе. Холодильные машины выбирались с холодопроизводительностью в интервале 15...30 кВт и 50...100 кВт.

Результаты расчета зависимостей коэффициента перобразования по полной цепи холодильных машин известных производителей и термотрансформатора на базе СТК (ТТ с СТК) в зависимости от температуры в испарителе представлены в виде графиков (рисунки 3-6).

На рисунке 3.5 представлено сравнение холодильных машин производителей Bitzer и Danfos с холодопроизводительностью $Q_o=15\div30$ кВт и термотрансформатора на базе СТК на веществе R134а. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК в определенном интервале температур лучше выбранных ХМ: при температуре конденсации $t_k=40\text{--}50^\circ\text{C}$ это явно видно, а при $t_k=30^\circ\text{C}$ лучшие показатели до температуры в испарителе $t_4=-14^\circ\text{C}$.

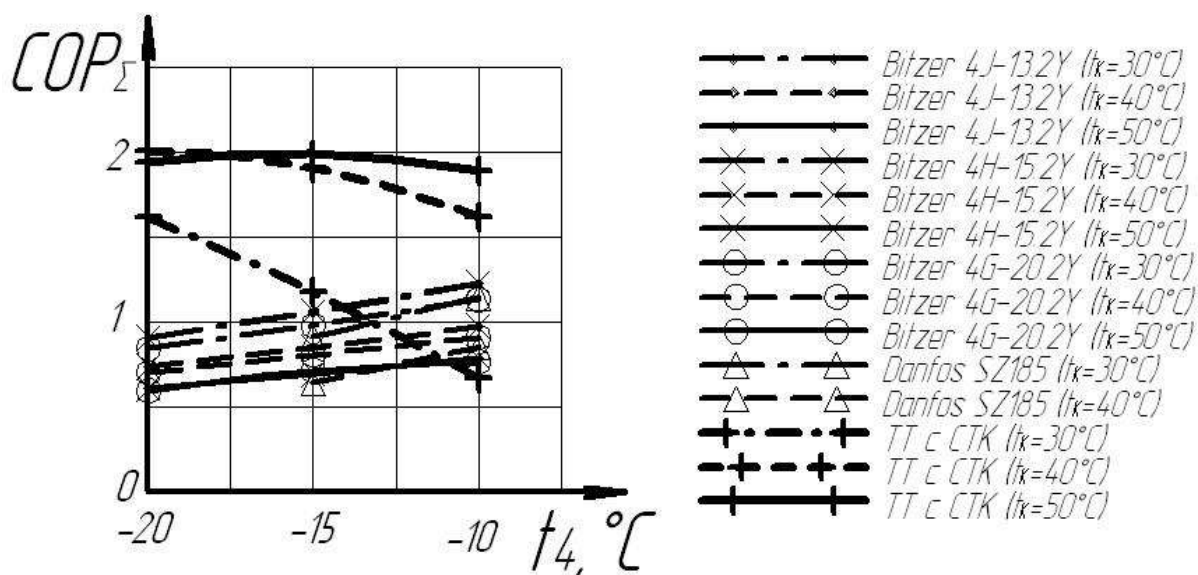


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве 2°C , на веществе R134а и холодопроизводительности $Q_o=15\div30$ кВт

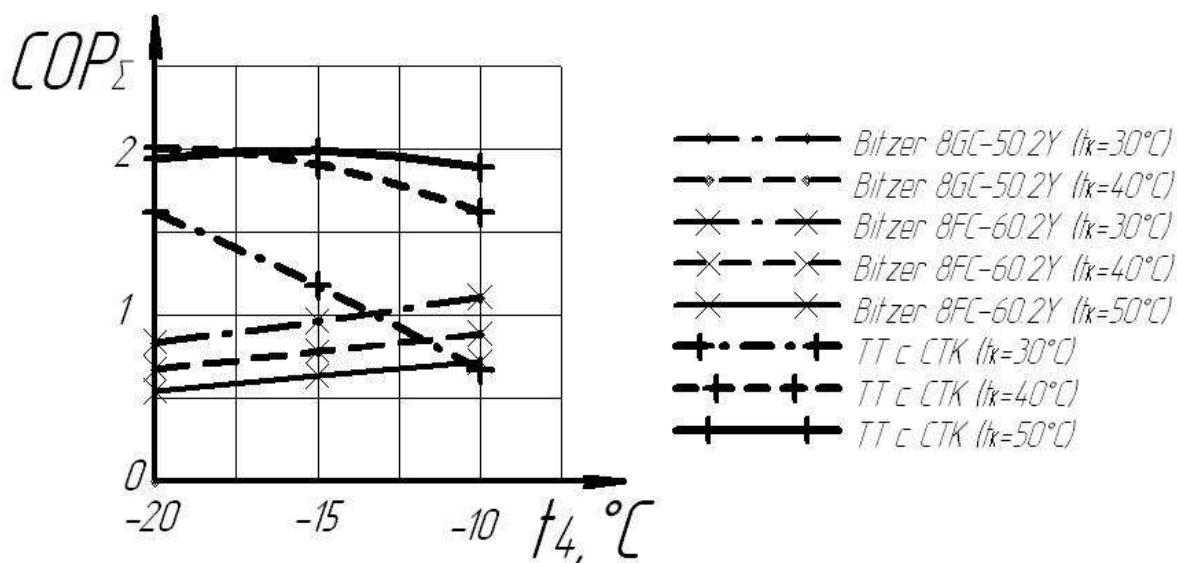


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве 2°C , на веществе R134а и холодопроизводительности $Q_o=50\div100$ кВт

На рисунке 3.6 представлено сравнение холодильных машин производителя Bitzer с холодопроизводительностью $Q_0=50\div100$ кВт и термотрансформатора на базе СТК на веществе R134a. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК также лучше выбранных ХМ: при температуре конденсации $t_k=40\text{--}50^\circ\text{C}$ это явно видно, а при $t_k=30^\circ\text{C}$ лучшие показатели до температуры в испарителе $t_4=-13^\circ\text{C}$.

На рисунке 3.7 представлено сравнение холодильных машин отечественных производителей «ОАО» РЕФМА ($t_k=30\text{--}35^\circ\text{C}$) и зарубежных производителей Bitzer, Copeland и Danfos с холодопроизводительностью $Q_0 = 15\div30$ кВт и термотрансформатора на базе СТК на веществе R22. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК по сравнению с ХМ «ОАО» РЕФМА при температуре конденсации $t_k = 30^\circ\text{C}$ хуже, но при $t_k = 35^\circ\text{C}$ показатели лучше до температуры в испарителе $t_4=-13^\circ\text{C}$. Такая же ситуация просматривается и для остальных ХМ при температуре конденсации $t_k=30^\circ\text{C}$, а при температуре конденсации $t_k=40\text{--}50^\circ\text{C}$ у ТТ с СТК показатели гораздо лучше до температуры в испарителе $t_4 = -14^\circ\text{C}$ (при $t_k = 40^\circ\text{C}$) и полностью лучше в заданно интервале температур ($t_4 = -20\text{--}-10^\circ\text{C}$) при $t_k = 50^\circ\text{C}$.

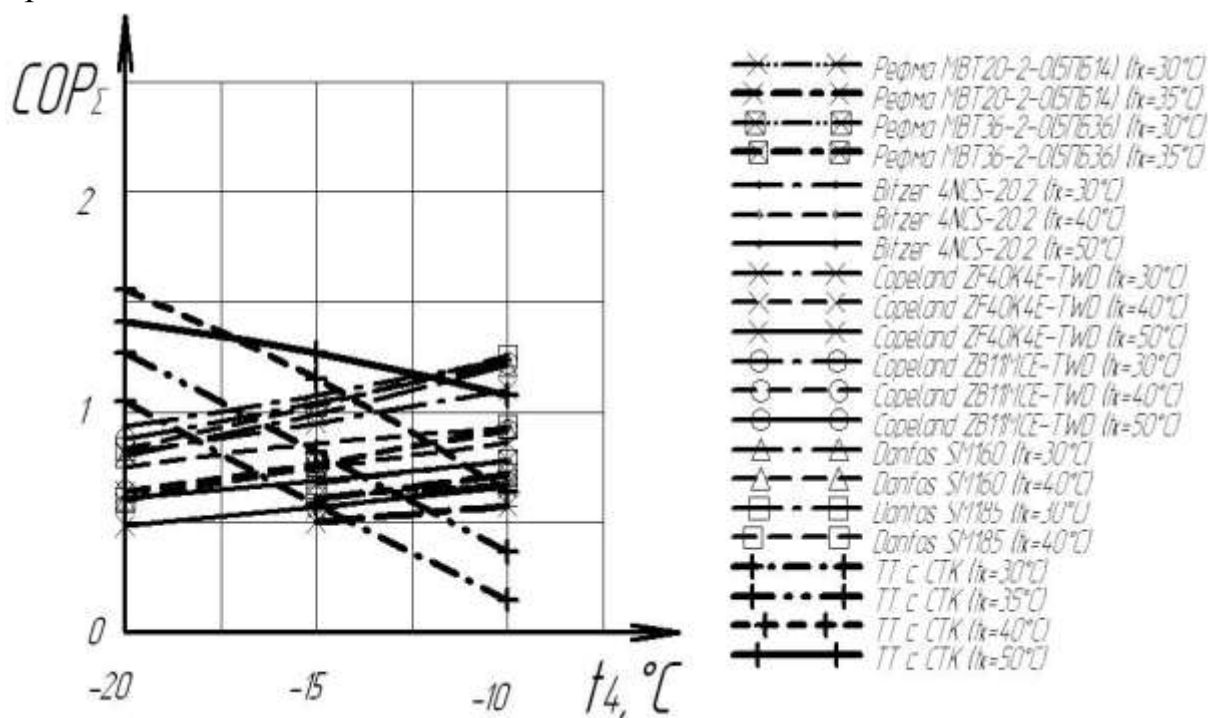


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве 2°C , на веществе R22 и холодопроизводительности $Q_0=15\div30$ кВт

На рисунке 3.8 представлено сравнение холодильных машин производителя Bitzer с холодопроизводительностью $Q_o=50\div 100$ кВт и термотрансформатора на базе СТК на веществе R22. Из графика видно, что показатели коэффициента преобразования ТТ с СТК также лучше выбранных ХМ: при $t_k = 30^\circ\text{C}$ лучшие показатели в интервале температур в испарителе $t_4 = -20\ldots -19^\circ\text{C}$, а при температуре конденсации $t_k = 40\text{--}50^\circ\text{C}$ у ТТ с СТК показатели выше до температуры в испарителе $t_4 = -13^\circ\text{C}$ (при $t_k = 40^\circ\text{C}$) и полностью лучше в заданно интервале температур ($t_4 = -20\ldots -10^\circ\text{C}$) при $t_k = 50^\circ\text{C}$.

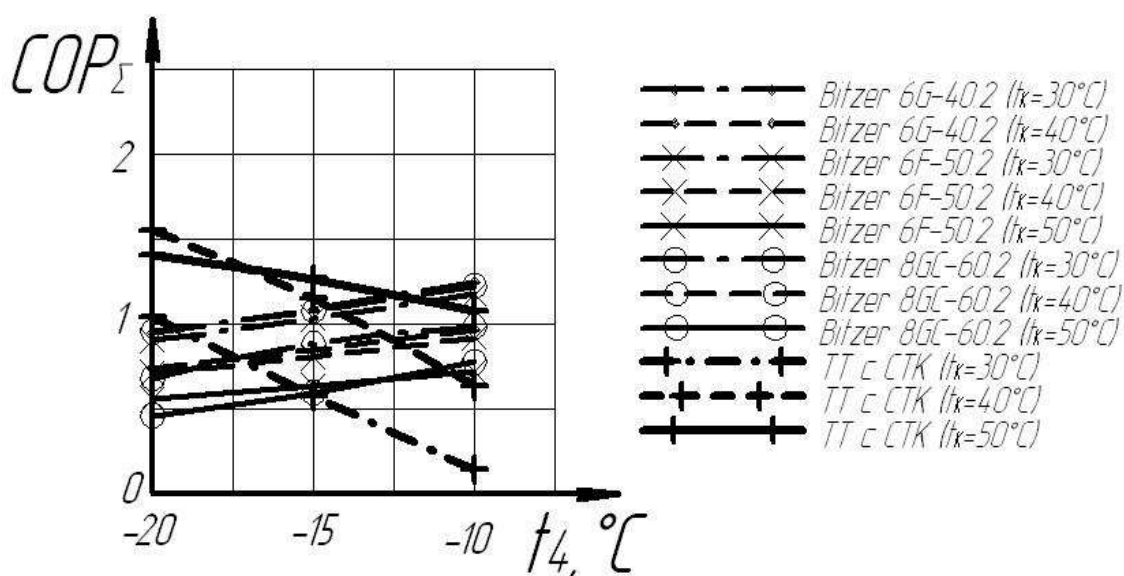


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента преобразования от температуры в испарителе при перегреве 2°C , на веществе R22 и холодопроизводительности $Q_o=50\div 100$ кВт

1. Для определенного диапазона температур в испарителе коэффициент преобразования термотрансформатора на базе СТК может быть выше, чем для существующих холодильных машин.

2. Такие высокие показатели коэффициента преобразования по полной цепи термотрансформатора на базе СТК по сравнению с выбранными холодильными машинами известных производителей достигаются за счет того что удельная работа насоса СТК меньше удельной работы компрессоров ХМ.

3. Наибольшие показатели коэффициента преобразования в термотрансформаторе на базе струйно-термокомпрессорного модуля достигаются на веществе R134a.

4 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА

4.1 Алгоритм расчета

На основе указанной термодинамической модели составлен алгоритм расчета понижающего термотрансформатора:

I. Рабочая струя

1. По таблице насыщения по значению t_o определить p_{so} , V'_o , h'_o , S'_o .
2. $h_o = h'_o$, $S_o = S'_o$.
3. По таблице насыщения по значению p_o определить t_{so} .
4. $\Delta t_H = t_{so} - t_o$.
5. $(1 - \varepsilon_{so}) = \frac{p_o - p_{so}}{p_o}$.
6. Если $(1 - \varepsilon_{so}) = 0,47 \dots 0,58$, тогда $\nu_f = 1,12$,
если $(1 - \varepsilon_{so}) = 0,36 \dots 0,47$, тогда $\nu_f = 0,677 + 0,923(1 - \varepsilon_{so})$;
если $(1 - \varepsilon_{so}) \leq 0,36$, тогда $\nu_f = 1$.
6. $w_f = \mu_o \cdot \nu_f \cdot \sqrt{2(p_o - p_{so}) \cdot V'_o \cdot 10^5}$.
7. По таблице насыщения по значению p_a определить t_a , V'_a , V''_a , h'_a , h''_a , r_a , S'_a , S''_a .
8. $w_{as} = \sqrt{2000 \cdot (h_o - h'_a - t_a \cdot (S_o - S'_a))}$.
9. $\gamma_{as} = \frac{w_{as}}{w_f}$.
10. $w_a = \varphi_a \cdot w_{as}$.
11. $\gamma_{as} = \frac{w_{as}}{w_f}$.
12. $f_{as} = \frac{h_o - h'_a + \frac{V'_a}{V''_a - V'_a} \cdot r_a - \sqrt{\frac{w_{as}}{2000}}}{\gamma_{as} \cdot \frac{V_o}{V''_a - V'_a} \cdot r_a}$.

$$13. c_k = 2 \cdot \frac{\sin \frac{\alpha_k \cdot 3,14}{2 \cdot 180}}{\cos \frac{\alpha_k \cdot 3,14}{2 \cdot 180}}.$$

$$14. z_{as} = \frac{1}{c_k} \cdot (\sqrt{f_{as}} - 1).$$

$$15. S_a = S_o.$$

$$16. \text{ По таблице насыщения по значению } t_a + \Delta t \text{ определить } V'_{жа}, V''_{жа}, h'_{жа}, h''_{жа}, S'_{жа}, S''_{жа}.$$

$$17. h''_o = h'_{жа} + \frac{S_a - S'_{жа}}{S_a - S''_{жа}} \cdot (h''_a - h'_{жа}) + \frac{\sqrt{w_a}}{2000}$$

$$18. \text{ Необходимо, чтобы } \frac{h_o}{h''_o} = 1.$$

$$19. x_a = \frac{h_o - h'_a - \frac{\sqrt{w_a}}{2000}}{r_a}.$$

$$20. V_a = V'_{жа} + x_a \cdot (V''_a - V'_{жа}).$$

$$21. h_a = h'_{жа} + x_a \cdot (h''_a - h'_{жа}).$$

$$22. A_k = \frac{\sqrt{w_a}}{V_a \cdot p_a \cdot 10^5}.$$

$$23. f_a = \frac{V_a}{\gamma_a \cdot V_o}.$$

$$24. z_{as} = \frac{1}{c_k} \cdot (\sqrt{f_a} - 1).$$

$$25. \alpha_a = \sqrt{\frac{10^5 \cdot \kappa \cdot p_a \cdot V_a^2}{V_a - V'_a}}.$$

$$26. M_\alpha = \frac{w_a}{\alpha_{a*}}.$$

II. Инжектируемая среда

$$1. p_{o2} = 2 \cdot p_a - \Delta p.$$

2. По таблице насыщения по значению p_{o2} определить t_{o2} , V'_{o2} , V''_{o2} , h'_{o2} , h''_{o2} , r_{o2} , S'_{o2} , S''_{o2} .

$$2. h_{o2} = h''_{o2}, \quad S_{o2} = S''_{o2}, \quad V_{o2} = S''_{o2}.$$

$$3. \alpha_{2*} = \sqrt{10^5 \cdot \kappa \cdot p_a \cdot V''_a}.$$

$$4. w_2 = \varphi \cdot \sqrt{2000 \cdot (h_{o2} - h'_a - t_a \cdot (S_{o2} - S'_a))}.$$

5. Необходимо, чтобы $w_2 = w_a$ при $w_a < \alpha_{2*}$ или $w_2 = \alpha_{2*}$ при $w_a \geq \alpha_{2*}$.

$$6. M_2 = \frac{w_2}{\alpha_{2*}}.$$

$$7. h_2 = h_{o2} - \frac{w_2^2}{2000}.$$

$$8. V_2 = V''_a.$$

$$9. \alpha_2 = \frac{w_2}{w_a}.$$

$$10. x_2 = \frac{h_{o2} - h'_a - \sqrt{\frac{w_a}{2000}}}{r_a}.$$

$$11. S_2 = S'_a + x_2 \cdot (S''_a - S'_a).$$

$$12. \beta_a = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{x_a} - 1 \right) \cdot \frac{v'_{o2}}{v''_{o2}}}.$$

III. Расчет диффузора

1. По таблице насыщения по значению p_4 определить t_4 , V'_4 , V''_4 , h'_4 , h''_4 , r_4 , S'_4 , S''_4 .

$$2. \beta_* = 1.$$

$$3. p_3 = p_{o2} + \Delta p_3.$$

4. По таблице насыщения по значению p_4 определить t_3 , V'_3 , V''_3 , h'_3 , h''_3 , r_3 , S'_3 , S''_3 .

$$5. \Delta V_3 = V''_3 - V'_3.$$

$$6. a_3 = \frac{\sqrt{10 \cdot M_3} \cdot \kappa \cdot p_3 \cdot \Delta V_3}{2 \cdot \beta_* \cdot r_3}.$$

$$7. b_3 = \frac{t_4}{t_3} - (1 - \eta_s).$$

$$8. c_3 = h'_4 - \frac{t_4}{t_3} \cdot h'_3.$$

$$9. d_3 = t_4 \cdot (S'_4 - S'_3).$$

$$10. e_3 = h'_3 - r_3 \cdot \frac{V'_3}{\Delta V_3}.$$

$$11. h_4 = \frac{(1 + a_3) \cdot (d_3 - c_3) - a_3 \cdot b_3 \cdot e_3}{b_3 - \eta_s \cdot (1 + a_3)}.$$

$$12. h_3 = \frac{\eta_s \cdot h_4 - c_3 + d_3}{b_3}.$$

$$13. x_3 = \frac{h_3 - h'_3}{r_3}.$$

$$14. V_3 = V'_3 + x_3 \cdot \Delta V_3.$$

$$15. \beta_* = \frac{V_3 - V'_3}{V_3}.$$

$$16. w_3 = \sqrt{2000 \cdot (h_4 - h_3)}.$$

$$17. U_d = \frac{h_4 - h_o}{h'_{o2} - h_4}.$$

$$18. f_k = 1 + U_d \cdot \frac{V_2}{V_a}.$$

$$19. f_3 = (1 + U_d) \cdot \frac{\beta_* \cdot w_a \cdot w_3}{\sqrt{M_3} \cdot \kappa \cdot V_a \cdot p_3 \cdot 10^5}.$$

$$20. A_k = \frac{\sqrt{w_a}}{V_a \cdot p_a \cdot 10^5}.$$

$$21. B_k = f_3 \cdot \left(1 + \frac{\sqrt{M_3} \cdot \kappa}{\phi_\kappa \cdot \beta_*} \right) \cdot \frac{p_3}{p_a}.$$

$$22. U_k = \frac{B_k - A_k + \frac{1-f_3}{2} \left(\frac{p_3}{p_a} \right)^{1-n} - \frac{1+f_3}{2}}{\alpha_2 \cdot A_k - \frac{V_2}{2 \cdot \alpha_2 \cdot V_a} \left(\left(\frac{p_3}{p_a} \right)^{1-n} - 1 \right)}.$$

$$23. \text{Необходимо, чтобы } h_4 > h_o, U_d = U_k = U.$$

$$24. \beta_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{x_3} - 1 \right) \cdot \frac{v'_3}{v''_3}}.$$

$$25. x_4 = \frac{h_4 - h'_{41}}{r_4}.$$

$$26. \beta_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{x_4} - 1 \right) \cdot \frac{v'_4}{v''_4}}.$$

$$27. V_4 = V'_4 + x_4 \cdot (V''_4 - V'_4).$$

$$28. \psi_4 = x_4 \cdot \frac{1+U}{U}.$$

$$29. S_3 = S'_3 + x_3 \cdot (S''_3 - S'_3).$$

$$30. S_4 = S'_4 + x_4 \cdot (S''_4 - S'_4).$$

$$31. \Delta S_3 = S_3 - S_a - U \cdot (S_2 - S_3).$$

IV. Параметры цикла:

$$1. \text{По таблице насыщения по значению } t_{o3} \text{ определить } V'_{o3}, h'_{o3}, S'_{o3}.$$

$$2. V_{o3} = V'_{o3}, h_{o3} = h'_{o3}, S_{o3} = S'_{o3}, p_{o3} = p_4.$$

$$3. h_{o4} = h_{o3}.$$

$$4. x_{o4} = \frac{h_{o4} - h'_{o2}}{r_{o2}}.$$

$$5. S_{o4} = S'_{o2} + x_{o4} \cdot (S''_{o2} - S'_{o2}).$$

$$6. V_{o4} = V'_{o2} + x_{o4} \cdot (V''_{o2} - V'_{o2}).$$

$$7. l_{in} = \frac{V'_4 \cdot (p_o - p_4) \cdot 10^2}{\eta''_{oi}}.$$

$$8. q_a = h_o - h'_4 - l_{ih} + (h'_4 - h_{o3}) \cdot (\psi_4 - 1) \cdot U.$$

$$9. d_o = 1 - \frac{1}{\psi_4}.$$

$$10. l_\kappa = \frac{l_{ih}}{U \cdot \psi_4}.$$

$$11. q_\kappa = \frac{q_a}{U \cdot \psi_4}.$$

$$12. q_x = \frac{h_{o2} - h_{o4}}{\psi_4}.$$

$$13. q_\Gamma = h''_4 - h_{o3}.$$

$$14. \varepsilon_{i\Gamma} = \frac{q_\Gamma}{q_\kappa + l_\kappa}.$$

$$15. \varepsilon_{ix} = \frac{q_x}{q_\kappa + l_\kappa}.$$

$$16. \psi_q = U \cdot \psi_4 \cdot \frac{q}{\eta_{ITT}^{-1} \cdot q_a + \eta_{mH}^{-1} \cdot l_{ih}}.$$

$$17. e''_4 - e_{o3} = h''_4 - h_{o3} - t_{o.c.} \cdot (S''_4 - S_{o3}).$$

$$18. e_{o2} - e_{o3} = h_{o2} - h_{o3} - t_{o.c.} \cdot (S_{o2} - S_{o3}).$$

$$19. \eta_{eCTK} = U \cdot \frac{\psi_4 \cdot (e''_4 - e_{o3}) - (e_{o2} - e_{o3})}{\eta_{ITT}^{-1} \cdot q_a + \eta_{mH}^{-1} \cdot l_{ih}}.$$

$$20. \eta_e = U \cdot \frac{\psi_4 \cdot (e''_4 - e_{o3})}{\eta_{ITT}^{-1} \cdot q_a + \eta_{mH}^{-1} \cdot l_{ih}}.$$

$$21. \eta_{\varepsilon\varepsilon} = U \cdot \frac{\psi_4 \cdot (e''_4 - e_{o3})}{\eta_{ITT}^{-1} \cdot q_a + \eta_{mH}^{-1} \cdot l_{ih} \cdot \alpha_3^{-1}}.$$

4.2 Программный комплекс

На основе программного комплекса для расчета термотрансформатора и по данным испытаний СТК на водяном паре была разработана программа для расчета термотрансформатора на хладоне R-142 по заданному алгоритму. Текст программы представлен в приложении А, а окно программы - на рис. 4.1.

Исходные данные			
P0, бар	t_0, C	p_a, бар	p4
20	82.2	0.5365	14.0852
fi_a	fi_p	fi_k	fi_3
0.97	0.95	0.95	0.97
mu0	alfa_k	k_p	M3
0.97	8	1.135	0.85
kpd_s	n		
0.8	0.5		

Результаты расчетов				
U	psi_q	kpd_eCTK	kpd_e	kpd_эз
0.051236581	3.132159823	0.851152684	0.501498236	0.229368215
p_02	1-e_s	alfa_n	d0	W_n/W_a
1.00000000	0.26053985	0.25684947	0.05140478	0.69598335
f_a	z_a	f_k	f_3	
25.9797904	29.3105621	1.10225847	0.10475099	

Рисунок 4.1 – Окно программы «Понижающий термотрансформатор»

Порядок выполнения вычислений:

1. Введите исходные данные. Десятичную запятую необходимо вводить как точку.

В процессе численного эксперимента предварительно рассчитывается область возможных режимов работы компрессора по числу Маха M_3 во

входном сечении диффузора и устанавливается оптимальное значение относительной скорости M_3 , соответствующее максимуму коэффициента инжекции u и, следовательно, – достижимым показателям эффективности СТК, а значит, и – понижающего термотрансформатора.

2. После введения параметров необходимо нажать «ОК». Результаты расчета появятся в нижней части окна.

3. Результаты вычислений также сохраняются в файле «Rez».

4.3 Показатели комбинированного цикла

По результатам численного эксперимента были получены сведения об эффективных показателях термодинамического цикла и влиянии на них различных определяющих факторов. Все результаты расчетов в табличном виде представлены в приложении Б.

Специфической особенностью струйного термокомпрессора является возможность достижения высокой степени повышения давления $\pi = (p_c / p_{o2}) \approx 10 \dots 20$ при сохранении стабильной эффективности за счет роста кинетической энергии (и импульса) рабочей струи [7] по мере снижения давления в испарителе p_{o2} и, соответственно, – в выходном сечении активного сопла p_a при неизменных параметрах в сепараторе ($p_c, t_c = const$).

Вместе с тем, в отличие от рабочего процесса на водяном паре [4], использование легкокипящих жидкостей в СТК сопровождается проявлением кризисных явлений в инжектируемом потоке пара и сопутствующих им потерь «на удар» (рис. 4.2). Из-за низкого уровня значений коэффициента массовой инжекции ($u \approx 10^2$) влияние этих потерь, определяемых комплексом $u \cdot (w_a - w_n)^2$ [10], заметно проявляется обычно лишь при давлении $p_{o2} \approx 0,5 \dots 0,6$ бар ($\pi_k \approx 20$). Уменьшение при дальнейшем снижении давления p_{o2} коэффициента инжекции u приводит к падению коэффициента преобразования ψ_q и эффективных показателей (рис. 4.3): степени

совершенства струйного термокомпрессора η_{eCTK} , а значит, и – понижающего термотрансформатора.

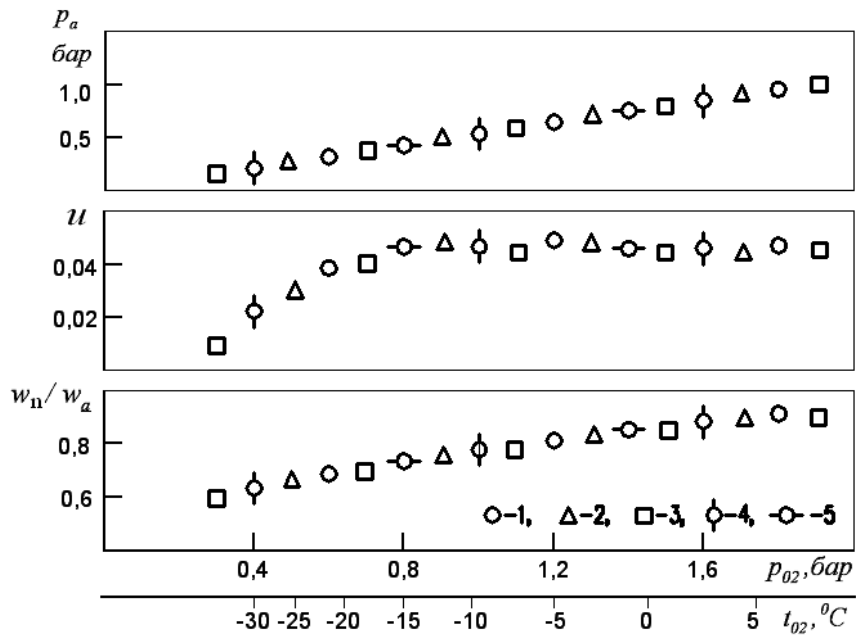


Рисунок 4.2 – Влияние давления в испарителе на инжекцию пара в струйном компрессоре: $t_{o1} = 70^\circ\text{C}$, $p_{o1} = 11,4$ бар, $t_{o3} = 45^\circ\text{C}$; 1 – $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$, 2 – 3°C , при $p_{oa} = 20$ бар; 4 – $P_{oa} = 17$ бар, 5 – 25 бар при $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$

Указанный механизм ограничения стабильной работы сохраняется в заданном (таблица 4.1) диапазоне изменения степени перегрева рабочей жидкости Δt_a и давления насоса p_{oa} . Однако, чрезмерный перегрев Δt_a в установленном оптимальном интервале давлений $p_{oa} \approx 17...25$ бар приводит к заметному снижению коэффициента преобразования ψ_q и эффективных показателей η_{eCTK} , η_e термотрансформатора за счет перепроизводства пара (приближение к традиционному способу передачи энергии E_I в поточном процессе) и росту диссипации энергии в проточных частях компрессора.

Аналогичное влияние перегрева жидкости Δt_a на рабочий процесс наблюдается при исследовании возможностей расширения температурного интервала трансформации тепла (рис. 4.4). Изменение температурного уровня теплоснабжения в диапазоне, характерном для современных отопительных

систем ($t_{o1} \approx 50 \dots 80$ °C), при оптимальном давлении подачи p_{oa} , сравнительно мало меняет достигаемые эффективные показатели.

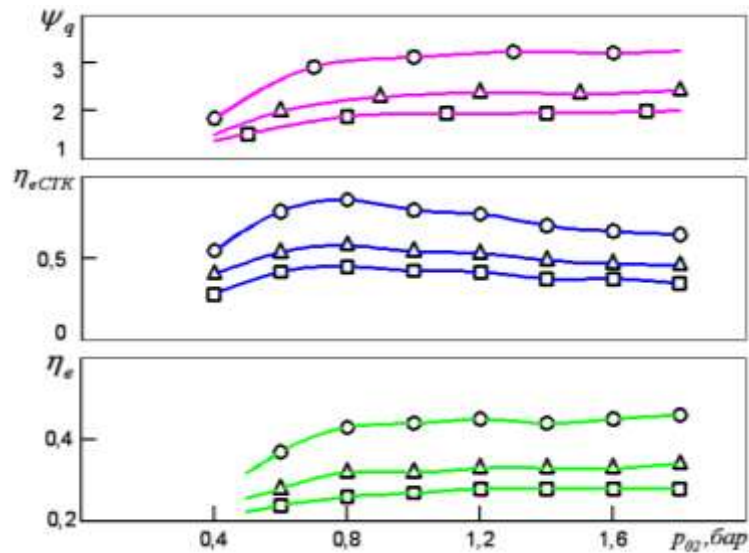


Рисунок 4.3 – Зависимость достижимых эффективных показателей термотрансформатора от давления в испарителе (условные обозначения на рисунке 4.1)

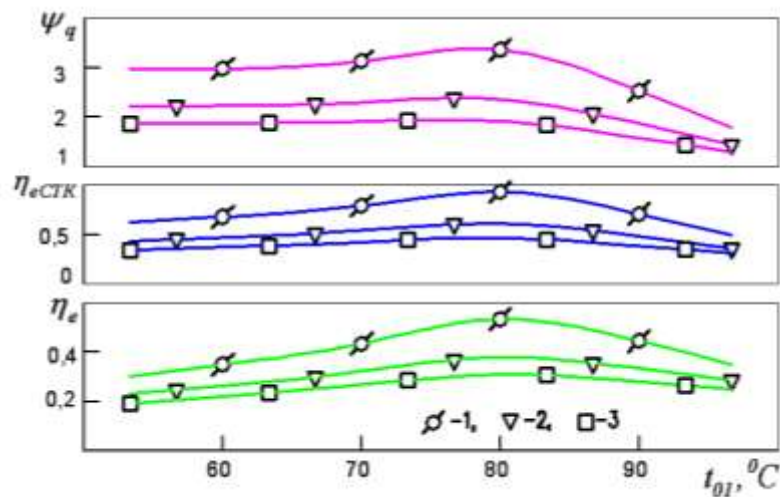


Рисунок 4.4 – Уровень эффективных показателей термотрансформатора в характерном температурном интервале определяющих параметров: $p_{oa} = 12 \dots 30$ бар при условии $(1 - \varepsilon_{so}) \approx 0,4$, $p_{o2} = 1$ бар, $t_{o3} = 45$ °C; 1 – $\Delta t_a = 2$ °C, 2 – 3 °C, 3 – 4 °C

Причина такой слабой чувствительности к увеличению степени повышения давления π_k , как уже отмечалось, связана с ростом скорости w_a и импульса рабочей струи при переходе в данном случае к более высоким параметрам (p_c , t_c) в сепараторе. Этим объясняется и значительное влияние

эффективности истечения, характеризующее коэффициент скорости φ_α активного сопла струйного компрессора, на степень совершенства понижающего термотрансформатора (рис. 4.5).

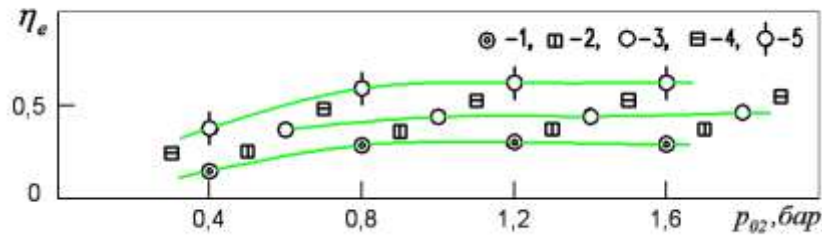


Рисунок 4.5 – Зависимость степени совершенства термотрансформатора от эффективности преобразования энергии в активных соплах струйного компрессора: $t_c = 70^\circ\text{C}$, $p_{oa} = 20$ бар, $p_{oa} = 20$ бар, $\Delta t_a = 2^\circ\text{C}$, $t_{o3} = 45^\circ\text{C}$;
1 – $\varphi_\alpha = 0,95$, 2 – 0,96, 3 – 0,97, 4 – 0,98, 5 – 0,99

По результатам численного эксперимента из исследуемого диапазона определяющих параметров комбинированного цикла был выбран оптимальный вариант, соответствующий наиболее высоким эффективным показателям термодинамического цикла. Он и был принят за основу для последующих расчетов. Таким образом, в качестве исходных приняты следующие характеристики оборудования:

Таблица 4.1 – Диапазон изменения определяющих факторов

Показатель	Обозначение	Размерность	Численное значение
Рабочие параметры пара в сепараторе (конденсаторе теплоснабжения):			
- температура	$t_{o1} = t_c$	$^\circ\text{C}$	80
- давление	$p_{o1} = p_c$	бар	14,1
Перегрев циркуляционной жидкости в подогревателе	Δt_a	$^\circ\text{C}$	2,2
Давление нагнетания циркуляционного насоса	p_{oa}	бар	20
Параметры кипения в испарителе:			
-температура	t_{o2}	$^\circ\text{C}$	9,6
-давление	p_{o2}	бар	1,0
Температура переохлажденного конденсата	t_{o3}	$^\circ\text{C}$	45

Результаты расчета базового варианта приведены в таблице 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 – Параметры в характерных точках и показатели прямого цикла модуля СТК

Сечение	p	$t, (t_{жа})$	ν	h	s	x	β
	бар	°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)		
0a	20	82,2	0,001099	529,99	4,5369	0	0
0n (02)	1	-9,6	0,211001	631,69	4,9965	1	1
a	0,536	-24	0,189852	506,25	4,5370	0,5	0,996
n	0,536	-24	0,37877	620,45	4,9527	1	1
c	14,1	80	0,001844	534,77	4,5509	0,05	0,439

$\varphi_a=0,97$, $w_a=218,3$ м/с, $M_3=0,86$, $\varphi_k=0,92$, $u=0,0512$, $\eta_{eCTK}=0,851$,

$(1-\varepsilon_{so})=0,26$

Таблица 4.3 – Параметры в характерных точках цикла и основные показатели понижающего термотрансформатора

Характерная точка цикла	p	t	ν	h	s	x	$1-d_0$
	бар	°C	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)		
01	14,1	80	0,01613	689,5	4,9888	1	0
03	14,1	45	0,000962	476,4	4,3809	0	0
04	1,0	-9,6	0,064847	476,4	4,3983	0,31	0,949
02	1,0	-9,6	0,211001	631,7	4,9965	1	0,949

$d_0=0,051$, $l_k=17,5$ кДж/кг, $q_k=50,5$ кДж/кг, $q_x=147,6$ кДж/кг, $q_e=213,1$ кДж/кг,

$\psi_q=3,13$, $\eta_e=0,501$, $w_n/w_a=0,696$, $d_N=0,257$, $\eta_{э}=0,229$

ВЫВОДЫ

1. В работе выполнен анализ известных способов теплоснабжения и рассмотрен принцип струйной термокомпрессии для термотрансформации низкопотенциальных тепловых потоков.

2. Выполнены предварительные исследования рабочего процесса понижающего гибридного термотрансформатора и дана оценка достижимых показателей энергоэффективности.

3. Определена область исходных режимных параметров, соответствующая максимальным значениям COP.

4. Выполнена оценка энергоэффективности исследуемого термотрансформатора при использовании в качестве рабочего вещества синтезированных хладагентов и их смесей, а также чистых углеводородов.

5. Дана оценка энергоэффективности термотрансформатора при его работе в режиме холодильной машины, показаны преимущества в сравнении с парокомпрессорными холодильными машинами отечественных и зарубежных производителей.

6. Установлены основные параметры для проектирования опытно-промышленного образца струйного термотрансформатора для системы теплоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаворский О.Н., Полищук В.Л., Лившиц И.М., Длугосельский В.И. Мировой опыт и перспективы внедрения парогазовых и газотурбинных технологий в теплоэнергетику России на основе возможностей отечественного энергомашиностроения // Теплоэнергетика. – 2007. – №9. – с.46.
2. Парова термотрансформаторна установка – Патент України №28398, МПК (2006) F25B1/100, Опубл. 10.12.2007. Бюл. №20.
3. Андрищенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. – М.: Высш. школа, 1975. – 263с.
4. Марченко В.Н., Прокопов М.Г., Одинцов В.Ф. Перспективы применения струйного термокомпрессора в малой теплоэнергетике.// Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. - №1 (11). – с.24– 30.
5. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224с.
6. Холодильные машины: Учебн. для вузов / Н.Н. Кошкин, И.А. Сакун, Е.М. Бамбушек и др. – Л.: Машиностроение, 1985. – 510с.
7. Марченко В.Н., Прокопов М.Г. Расчет парообразования в ускоряющихся потоках вскипающей жидкости. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. - №4 (10). – с.98– 105.
8. Марченко В.Н., Прокопов М.Г. Энергетическая эффективность парового струйного термокомпрессора.// Холодильна техніка і технологія. – 2007. – №5 (109). – с.45– 51.
9. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоиздат, 1989. – 352с.
10. Марченко В.Н., Жиленко Н.А. Струйная термокомпрессорная установка: назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований рабочего процесса// Вісник Сумського державного університету.-2004.-№13(72).-С. 50-60.

Приложение А

Текст программы «Понижающий термотрансформатор»

```
unit tabl;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls, IniFiles, Buttons, ComCtrls;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)  
  Label17: TLabel;  
  Edit14: TEdit;  
  Edit17: TEdit;  
  Edit10: TEdit;  
  Label11: TLabel;  
  Edit9: TEdit;  
  Edit8: TEdit;  
  Edit13: TEdit;  
  Label3: TLabel;  
  Edit15: TEdit;  
  Label4: TLabel;  
  Edit16: TEdit;  
  Label5: TLabel;  
  Label9: TLabel;  
  Label10: TLabel;  
  Label16: TLabel;  
  GroupBox3: TGroupBox;  
  Label14: TLabel;  
  Label25: TLabel;  
  Label28: TLabel;  
  Label32: TLabel;  
  Edit30: TEdit;  
  Edit44: TEdit;  
  Edit45: TEdit;  
  Edit49: TEdit;  
  Edit58: TEdit;  
  Edit61: TEdit;  
  Label6: TLabel;  
  Label45: TLabel;  
  GroupBox6: TGroupBox;  
  Label46: TLabel;  
  Label47: TLabel;  
  Label1: TLabel;  
  Label2: TLabel;  
  Label21: TLabel;  
  Label27: TLabel;  
  Label30: TLabel;  
  Label31: TLabel;  
  Label7: TLabel;  
  Label8: TLabel;
```

```

Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Edit1: TEdit;
Edit2: TEdit;
BitBtn5: TBitBtn;
Edit3: TEdit;
Edit4: TEdit;
Edit5: TEdit;
Edit6: TEdit;
Edit7: TEdit;
Edit11: TEdit;
Edit23: TEdit;
Edit24: TEdit;
Edit27: TEdit;
Edit28: TEdit;
Edit18: TEdit;
Edit19: TEdit;
Label18: TLabel;
Label19: TLabel;
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
private
public
end;

procedure DataFile;
procedure DataFileVoda;
procedure Data_A_02;
procedure Data;
procedure DataKzv;

var
Form1: TForm1;
PathIni:String;
a,b : integer;
TableAr : array[1..375,1..15] of real;
NaydenoAr : array[1..15] of real;
NaydenoAr2 : array[1..15] of real;
RezultAr : array[1..15] of real;
TableArVoda : array[1..81,1..4] of real;
RezultArVoda : array[1..4] of real;
K_zv : array[1..3,1..9] of real;
a_Ar : array[1..10] of real;
y_Ar : array[1..10] of real;
h_12 : array[1..10] of real;
t_12 : array[1..10] of real;
V_12 : array[1..10] of real;
S_12 : array[1..10] of real;
D_Ar : array[1..10] of real;
y2_Ar: array[1..10] of real;
a2_Ar: array[1..10] of real;
av_Ar: array[1..10] of real;
t_22 : array[1..10] of real;
c_12 : array[1..10] of real;

```



```

r_12 : array[1..10] of real;
y_Arv: array[1..10] of real;
t_delta: array[1..10] of real;
y2_Ar_5: array[1..10] of real;
a2_Ar_5: array[1..10] of real;
V_12_5: array[1..10] of real;
data_1: array[1..8,1..10] of real;
data_2: array[1..100,1..12] of real;
data_3: array[1..13] of real;
data_4: array[1..13] of real;

znachen : real;
q, qq, qqq, qqqq : real;
jj, k, l, ll, lll, llll : integer;
p0, t0, mu0, alfa_k, df, delta, e_zv, v : real;

p_s0, h_v0, S_v0, V_0, V_0_2, h_0, S_0, e_s, F,
m_a, P_f, W_f, c_k,

a_v, d_f, Nu, n, epsilon, beta_1, z_1, x_1,
delta_z, z_2, tg_1,
p_1, gama_1, f_1, a_1, t_1, S_1, V_1_2, r_1, delta_i, lamda_2, V_g1,
h_g1, S_g1, sum_y2, x_2, x_22, f_2, p_2, t_2, V_2_2, r_2, K_2, delta_h_0,
D_2, gama_2, gama_22, kapa_2, fi_2, p_22, h_2_2, S_2_2, h_g2,
tg_2, V_g2, Sg_2, S_2, delta_S, sum_delta_S, beta_2, c_g, sum_y2_t2, tg_22,
delta_z_2, V_gv,
sum_y2_5, x_2_5, x_222,
b_p, p_11, b_a,
B1, C1, tau2, tau1, D1, a_2, V_2, x_v, M_2, delta_p, gama_a,
f_a, p_a, z_v, tau_delta, p_v, gama_v, f_v, Vg_a, Vp_2, Va : real;
z, p, t, t_g, gama1, x_0, beta_0, V_g, h_g, S_g, t_f, h_f, S_f, K_1, U_1, M_1,
gama11, p_s_tg, gam1, tg_v, t_v, h, c_g1, p_p, z_a, t_p, h_p, S_p,
kapa_a, W_as, gama_as, fi_a, fi_i, fi_m, epsilon_v, t_d_tau : real;
r_p, V_p_1, V_p_2, x_a_0, V_a_0, fi_m_0, gama_a_0, f_a_0, z_a_0, kapa_a_0,
fi_m_01, fi_i_0, S_g_a, S_a, delta_S_a, gama_m, delta_h, p_tabl, t_tabl : real;

b_z, z_n, z_k, bx, cx, gama_m2, p_01, F_m, c_k1, c_k2, alfa_k1, alfa_k2, z_p : real;

pp, i, g, ii, iii, iiiii, nn : integer;

FText, TTText : TextFile;

k_p, W2, fi_k, kpd_s, p4, psi_m,
lamda_3, lamda_c, f_c, fi_c, x_02 : real;

h0, S0, V0, Ps0, Vs0, t_sp, V_p, h_p2, V_p2, S_p2,
delta_V, W_a, V_a, x_a,
beta_a, Ma, alfa_c, A_c, L_c, D_c, K_c, U_c1, b_c,
c_c, U_c2, delta_alfa_c, W_c2, h_oc, V_c, otnW_c_k_W_a,
W_c, beta_c, x_c, M_c,
t_4, V_4, V_4_2, h_4, r_4, S_4, S_4_2, p3,
t_3, V_3, V_3_2, h_3, r_3, S_3, S_3_2, delta_V3,

```

```

a3, b3, c3, d3, e3, h4, delta_p3, U_k,
h3, W3, p2, A_k, f_k, b_k, p32,
U, x4, psi_4, S4, kpd_c, h_02, V_02, S_02 : real;
p_02, t_02, h_2, W_2otn, V_21, W_2, W_22, M3, beta_3, beta_33, x_3, B_a1, B_a2,
n2, p_k, h_4_2, x_4, beta_4, delta_e4, delta_e02,
t_k, V_k, V_k_2, h_k, r_k, V3, E_k, Vk, Wk, x_k, beta_k, kzeta_k,
L_k, i_a, p3_0, S3, S_k, hk, h32, Aa, Sk, bk, ck, gk, Mk, b33, c33, g33,
B_aa1, B_aa2, beta_k2, p_k0 : real;

V_02_2, r_02, h02, S02, V02, g1, g12, V1, W1, x1, beta1, M1, S1 : real;
c_p, t_021, h_22, S_22, fi_3, V_022, h_022, S_022, a_zv, x_as, V_as, f_as, T_2s,
T_2p, V_2p, V2, a2_zv, beta_zv, f_3, B_, p_32, p_3, p_33, h_020, S_020, V_020, U_d, ppp,
p_zv, teta1, teta2, W_otn_zv1, W_otn_zv2, W_zv2, V_2zv, a_zvzv, p_zv1 : real;
h_020_2, V_22, kpd_n, L_n, kpd_0i, kpd_efff, kpd_eneff, A_02, x_022 : real;

p_03, delta_p2, delta_tp, kpd_t1, kpd_t0, kpd_pg, Ne, qn, ro_topl, c_topl, t_10,
q_a, V_10, h_10, S_10, p_20, h_20s, l_t1, h_20, t_20, V_20, S_20, q_p, A_022, p_30,
h_30s, L_t0, h_30, t_30, V_30, S_30, d_0, L_i, h_30_1, S_30_1, q_1p, q_0, q_1,
q_2, e_q, kpd_i, kpd_e, m_p, Q_pp, Q_aa, Q_00, Q_11, Q_tc, N_k, N_t, N_e, m_aa,
V_n, m_top, V_top, E_qq, alfa_cc, q_k, delta_p1, p_10 : real;
kapa, alfa, delta_1, I_1, I_2, I_3, c_a, b_k0, y_10, y_20, t_a, delta_tg, fi_p,
h_a_1, S_a_1, S_a_2, z_as, f_aa, z_aa, x_aa, V_aa, beta_aa, r_a, V_a_1, V_a_2, a_k0,
Vg_a_1, Vg_a_2, Sg_a_1, delta_S3, V4, h_a : real;

kpd_0i_t, kpd_0i_n, L_i_t, x02, d0, L_i_n, N_1i, q1, tg_a, hg_a_1, h_0_2, h_a_2,
l_k, d_3, kapa_k, q2, otn_q2, delta_eq, kpd_ee, kpd_m_t, kpd_m_n, kpd_k_a, kpd_g,
L_ik, L_t, L_e, kpd_e_ptu, ppp1, ppp2, kpd_stk, hg_a_2, V_v0, t_s0, delta_tn, a_zv_2,
t_03, kpd_p_t, V_03, h_03, S_03, V_030, h_030, S_030, x04, h_04, S_04, V_04, L_in,
q_x, q_g, e_ix, e_g, kpd_i_stk, e_ig, x_a2, alfa_2, alfa_n : real;

```

implementation

```
{ $R *.dfm }
```

```
procedure TForm1.BitBtn1Click(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
  p0:= StrToFloat(Edit1.Text);
```

```
  t0:= StrToFloat(Edit2.Text);
```

```
  mu0:= StrToFloat(Edit23.Text);
```

```
  alfa_k:= StrToFloat(Edit24.Text);
```

```
  AssignFile(FText, 'Rez.csv'); ReWrite(FText);
```

```
  lll:=1;
```

```
  while lll=1 do
```

```
  begin
```

```
    //Течение в начальном участке
```

```
    jj:=1; znachen:=t0;
```

```
    DataFile;
```

```
    p_s0:=RezultAr[2];
```

```
    V_0:=RezultAr[3];
```

```
    V_0_2:=RezultAr[4];
```

```
    h_0:=RezultAr[5];
```

```
    S_0:=RezultAr[8];
```

```

h_v0:=h_0;
S_v0:=S_0;
jj:=2; znachen:=p0;
DataFile;
t_s0:=RezultAr[1];
delta_tn:=t_s0-t0;
e_s:=p_s0/p0;
if (1-e_s)>=0.58 then
begin
F:=sqr(sqr(mu0))*(1-e_s);
jj:=3; znachen:=F;
DataKzv;
e_zv:=RezultAr[2];
m_a:=sqrt((1-e_zv)/(1-e_s));
end;
if (1-e_s)<0.58 then if (1-e_s)>=0.47 then
begin
m_a:=1.12;
end;
if (1-e_s)<0.47 then if (1-e_s)>=0.36 then
begin
F:=sqr(sqr(mu0))*(1-e_s);
jj:=3; znachen:=F;
DataKzv;
e_zv:=RezultAr[2];
m_a:=0.677+0.923*(1-e_s);
end;
if (1-e_s)<0.36 then m_a:=1;
W_f:=m_a*mu0*sqr(2*(p0-p_s0)*V_0*100000);

```

//Исходные данные

```

p4:=StrToFloat(Edit5.Text);
p_a:=StrToFloat(Edit4.Text);
fi_3:=StrToFloat(Edit7.Text);
fi_a:=StrToFloat(Edit6.Text);
fi_p:=StrToFloat(Edit11.Text);
k_p:=StrToFloat(Edit27.Text);
M3:=StrToFloat(Edit3.Text);
kpd_s:=StrToFloat(Edit28.Text);
fi_k:=StrToFloat(Edit18.Text);
n:=StrToFloat(Edit19.Text);
c_p:=1.95;
R_p:=461.5;
kpd_n:=0.8;

```

```

jj:=2; znachen:=p_a;
DataFile;
t_a:=RezultAr[1];
V_a_1:=RezultAr[3];
V_a_2:=RezultAr[4];
h_a_1:=RezultAr[5];
h_a_2:=RezultAr[6];
r_a:=RezultAr[7];

```

```

S_a_1:=RezultAr[8];
S_a_2:=RezultAr[9];

W_as:=sqrt(2000*(h_0-h_a_1-(S_0-S_a_1)*(t_a+273.15)));
gama_as:=W_as/W_f;
W_a:=fi_a*W_as;
gama_a:=W_a/W_f;
f_as:=(h_0-h_a_1+(V_a_1/(V_a_2-V_a_1))*r_a-
(sqr(W_as)/2000))/(gama_as*(V_0/(V_a_2-V_a_1))*r_a);
c_k:=2*sin(alfa_k*3.14/(2*180))/cos(alfa_k*3.14/(2*180));
z_as:=1/c_k*(sqrt(f_as)-1);
S_a:=S_v0;

tg_a:=t_a;
lll:=1;
while lll=1 do
begin
  tg_a:=tg_a+0.01-0.01;
  jj:=1; znachen:=tg_a;
  DataFile;
  Vg_a_1:=RezultAr[3];
  Vg_a_2:=RezultAr[4];
  hg_a_1:=RezultAr[5];
  hg_a_2:=RezultAr[6];
  Sg_a_1:=RezultAr[8];
  h_0_2:=hg_a_1+(S_a-Sg_a_1)/(S_a_2-Sg_a_1)*(h_a_2-hg_a_1)+sqr(W_a)/2000;
  if h_0/h_0_2 < 1.0001 then
  if h_0/h_0_2 > 0.9999 then lll:=2;
  lll:=2;
end;

x_a:=(h_0-h_a_1-sqr(W_a)/2000)/r_a;
V_a:=Vg_a_1+x_a*(V_a_2-Vg_a_1);
A_k:=sqr(W_a)/(V_a*p_a*100000);
f_a:=V_a/(V_0*gama_a);
z_a:=1/c_k*(sqrt(f_a)-1);
a_zv:=sqrt(100000*k_p*p_a*V_a{sqr(V_a)/(V_a-V_02)});
Ma:=W_a/a_zv;
h_a:=hg_a_1+x_a*(h_a_2-hg_a_1);
p_02:=p_a*2;

l:=1;
while l=1 do
begin
  p_02:=p_02-0.001;

//Рабочая струя
  jj:=2; znachen:=p_02;
  DataFile;
  t_02:=RezultAr[1];
  V_02:=RezultAr[3];
  V_022:=RezultAr[4];
  h_02:=RezultAr[5];

```

```

h_022:=RezultAr[6];
r_02:=RezultAr[7];
S_02:=RezultAr[8];
S_022:=RezultAr[9];

h_020:=h_022;
V_020:=V_022;
S_020:=S_022;
a_zv_2:=sqrt(100000*k_p*p_a*V_a_2);
W_2:=fi_p*sqrt(2000*(h_020-h_a_1-(S_020-S_a_1)*(t_a+273.15)));
if W_a < a_zv_2 then
  if W_2/W_a < 1.001 then
    if W_2/W_a > 0.999 then l:=2;
  if W_a > a_zv_2 then
    if W_2/a_zv_2 < 1.001 then
      if W_2/a_zv_2 > 0.999 then l:=2;
end;
a_zv_2:=sqrt(100000*k_p*p_a*V_a_2);
M_2:=W_2/a_zv_2;
h_2:=h_020-sqr(W_2)/2000;
V_2:=V_a_2;
alfa_2:=W_2/W_a;
x_2:=(h_020-h_a_1-sqr(W_a)/2000)/r_a;
S_2:=S_a_1+x_2*(S_a_2-S_a_1);
beta_a:=1/(1+(1/x_a-1)*V_02/V_022);

//Расчет диффузора
jj:=2; znachen:=p4;
DataFile;
t_4:=RezultAr[1];
V_4:=RezultAr[3];
V_4_2:=RezultAr[4];
h_4:=RezultAr[5];
h_4_2:=RezultAr[6];
r_4:=RezultAr[7];
S_4:=RezultAr[8];
S_4_2:=RezultAr[9];

beta_zv:=1;
ll:=1; delta_p3:=0.002; p3:=p_02;
while ll=1 do
  begin
    p3:=p3+delta_p3;
    jj:=2; znachen:=p3;
    DataFile;
    t_3:=RezultAr[1];
    V_3:=RezultAr[3];
    V_3_2:=RezultAr[4];
    h_3:=RezultAr[5];
    r_3:=RezultAr[7];
    S_3:=RezultAr[8];
    S_3_2:=RezultAr[9];

```

```

delta_V3:=V_3_2-V_3;
a3:=(sqr(10*M3)*k_p*p3*delta_V3)/(2*beta_zv*r_3);
b3:=((t_4+273.15)/(t_3+273.15))-(1-kpd_s);
c3:=h_4-((t_4+273.15)/(t_3+273.15))*h_3;
d3:=(t_4+273.15)*(S_4-S_3);
e3:=h_3-r_3*V_3/delta_V3;
h4:=((1+a3)*(d3-c3)-a3*b3*e3)/(b3-kpd_s*(1+a3));
h3:=(kpd_s*h4-c3+d3)/b3;
x_3:=(h3-h_3)/r_3;
V3:=V_3+x_3*delta_V3;
beta_zv:=(V3-V_3)/V3;
  if h4 > (h_v0-0) then ll:=2;
end;
W3:=sqrt(2000*(h4-h3));
U_d:=(h4-h_v0)/(h_020-h4);
f_k:=1+U_d*(V_2/V_a);
f_3:=(1+U_d)*(beta_zv*W_a*W3/(sqr(M3)*k_p*V_a*p3*100000));

//Камепа
a_k0:=sqr(W_a)/(V_a*p_a*100000);
b_k0:=f_3*(1+sqr(M3)*k_p/(fi_k*beta_zv))*p3/p_a;
U_k:=(b_k0-a_k0+(1-f_3)/2*exp((1-n)*ln(p3/p_a))-(1+f_3)/2)/(alfa_2*a_k0-
V_2/(2*alfa_2*V_a)*(exp((1-n)*ln(p3/p_a))-1));
  ll:=1; delta_p3:=0.0002; p_33:=p3;
while ll=1 do
begin
  p_33:=p_33+delta_p3;
  jj:=2; znachen:=p_33;
  DataFile;
  t_3:=RezultAr[1];
  V_3:=RezultAr[3];
  V_3_2:=RezultAr[4];
  h_3:=RezultAr[5];
  r_3:=RezultAr[7];
  S_3:=RezultAr[8];
  S_3_2:=RezultAr[9];
  delta_V3:=V_3_2-V_3;
  a3:=(sqr(10*M3)*k_p*p_33*delta_V3)/(2*beta_zv*r_3);
  b3:=((t_4+273.15)/(t_3+273.15))-(1-kpd_s);
  c3:=h_4-((t_4+273.15)/(t_3+273.15))*h_3;
  d3:=(t_4+273.15)*(S_4-S_3);
  e3:=h_3-r_3*V_3/delta_V3;
  h4:=((1+a3)*(d3-c3)-a3*b3*e3)/(b3-kpd_s*(1+a3));
  h3:=(kpd_s*h4-c3+d3)/b3;
  x_3:=(h3-h_3)/r_3;
  V3:=V_3+x_3*delta_V3;
  beta_zv:=(V3-V_3)/V3;
  W3:=sqrt(2000*(h4-h3));
  U_d:=(h4-h_v0)/(h_020-h4);
  f_k:=1+U_d*(V_2/V_a);
  f_3:=(1+U_d)*(beta_zv*W_a*W3/(sqr(M3)*k_p*V_a*p3*100000));
  fi_k:=0.92;
  a_k0:=sqr(W_a)/(V_a*p_a*100000);

```

```

b_k0:=f_3*(1+sqr(M3)*k_p/(fi_k*beta_zv))*p3/p_a;
U_k:=(b_k0-a_k0+(1-f_3)/2*exp((1-n)*ln(p3/p_a))-(1+f_3)/2)/(alfa_2*a_k0-
V_2/(2*alfa_2*V_a)*(exp((1-n)*ln(p3/p_a))-1));

if U_d/U_k < 1.02 then
if U_d/U_k > 0.99 then ll:=2;
end;

beta_3:=1/(1+(1/x_3-1)*V_3/V_3_2);
x_4:=(h4-h_4)/r_4;
V4:=V_4+x_4*(V_4_2-V_4);
beta_4:=1/(1+(1/x_4-1)*V_4/V_4_2);
U:=U_d;
psi_4:=x_4*(1+U)/U;
S3:=S_3+x_3*(S_3_2-S_3);
S4:=S_4+x_4*(S_4_2-S_4);
delta_S3:=S3-S_a-U*(S_2-S3);

t_03:=45;
kpd_0i_n:=0.8;
kpd_m_n:=0.96;
kpd_p_t:=0.95;

jj:=1; znachen:=t_03;
DataFile;
V_03:=RezultAr[3];
h_03:=RezultAr[5];
S_03:=RezultAr[8];

V_030:=V_03;
h_030:=h_03;
S_030:=S_03;
p_03:=p4;
x04:=(h_03-h_02)/r_02;
h_04:=h_03;
S_04:=S_02+x04*(S_022-S_02);
V_04:=V_02+x04*(V_022-V_02);
L_in:=V_4*(p0-p4)*100/kpd_0i_n;
q_a:=h_0-h_4-l_in+(h_4-h_03)*(psi_4-1)*u;
d0:=1-1/psi_4;
L_k:=l_in/(u*psi_4);
q_k:=q_a/(u*psi_4);
q_x:=(h_020-h_04)/psi_4;
q_g:=(h_4_2-h_030);
e_ig:=q_g/(q_k+L_k);
e_ix:=q_x/(q_k+L_k);
e_g:=(u*psi_4)*q_g/(1/kpd_p_t*q_a+1/kpd_m_n*L_in);
delta_e4:=h_4_2-h_030-293*(S_4_2-S_030);
delta_e02:=h_022-h_030-293*(S_022-S_030);
kpd_e:=u*(psi_4*delta_e4-delta_e02)/(1/kpd_p_t*q_a+1/kpd_m_n*L_in);
kpd_i_stk:=1-293*(psi_4*(S_4_2-S_030)-(S_022-S_030))/(psi_4*(h_4_2-h_030)-(h_022-
h_030));
kpd_efff:=u*psi_4*delta_e4/(1/kpd_p_t*q_a+1/kpd_m_n*L_in);

```

```

kpd_enef:=u*psi_4*delta_e4/(1/kpd_p_t*q_a+1/kpd_m_n*L_in*5);
alfa_n:=L_k/(L_k+q_k);
lll:=2;
llll:=2;
end;

Writeln(FText,'');
Writeln(FText,p0/10:2:4,';',t0:2:1,';',V_0:2:6,';',h_v0:2:3,';',S_0:2:4,';');
Writeln(FText,p_02/10:2:4,';',t_02:2:1,';',V_020:2:6,';',h_020:2:3,';',S_020:2:4,';',x_02:2:3,';');
Writeln(FText,p_a/10:2:4,';',tg_a:2:1,';',V_a:2:6,';',h_a:2:3,';',S_a:2:4,';',x_a:2:3,';',beta_a:2:3,';');
Writeln(FText,p_a/10:2:4,';',t_a:2:1,';',V_2:2:6,';',h_2:2:3,';',S_2:2:4,';',x_2:2:3,';',0.999:2:3,';');
Writeln(FText,p_33/10:2:4,';',t_3:2:1,';',V3:2:6,';',h3:2:3,';',S3:2:4,';',x_3:2:3,';',beta_3:2:3,';');
Writeln(FText,p4/10:2:4,';',t_4:2:1,';',V4:2:6,';',h4:2:3,';',S4:2:4,';',x_4:2:3,';',beta_4:2:3,';');
Writeln(FText,'');
Writeln(FText,fi_a:2:2,';',W_a:2:1,';',M3:2:2,';',fi_k:2:2,';',U:2:1,';',kpd_e:2:3,';',1-e_s:2:2,';');
Writeln(FText,alfa_k:2:2,';',c_k:2:3,';');
Writeln(FText,'');

Writeln(FText,p4/10:2:2,';',t_4:2:1,';',V_4_2:2:6,';',h_4_2:2:1,';',S_4_2:2:4,';');
Writeln(FText,p_03/10:2:2,';',t_03:2:1,';',V_030:2:6,';',h_030:2:1,';',S_030:2:4,';');
Writeln(FText,p_02/10:2:2,';',t_02:2:1,';',V_04:2:6,';',h_04:2:1,';',S_04:2:4,';',x04:2:3,';');
Writeln(FText,p_02/10:2:2,';',t_02:2:1,';',V_020:2:6,';',h_020:2:1,';',S_020:2:4,';');
Writeln(FText,'');

Writeln(FText,d0:2:3,';',L_k:2:2,';',q_k:2:2,';',q_x:2:2,';',q_g:2:2,';',e_g:2:2,';',kpd_eff:2:3,';',W_2/W_a:2:3,';',alfa_n:2:3,';',kpd_enef:2:3,';');
Writeln(FText,h_020:2:2,';',h_04:2:2,';',h_4_2:2:2,';',h_030:2:2,';');

CloseFile(FText);

Edit30.Text:=FloatToStr(U_k);
Edit45.Text:=FloatToStr(e_g);
Edit49.Text:=FloatToStr(kpd_e);
Edit44.Text:=FloatToStr(kpd_eff);
Edit58.Text:=FloatToStr(kpd_enef);
Edit61.Text:=FloatToStr(p_02);
Edit8.Text:=FloatToStr(1-e_s);
Edit9.Text:=FloatToStr(alfa_n);
Edit10.Text:=FloatToStr(d0);
Edit13.Text:=FloatToStr(W_2/W_a);
Edit14.Text:=FloatToStr(f_a);
Edit15.Text:=FloatToStr(z_a);
Edit16.Text:=FloatToStr(f_k);
Edit17.Text:=FloatToStr(f_3);
end;

procedure DataFile;
var
  f : TextFile;
  i, j, k, m : integer;
  koef, n : real;
begin
  AssignFile(F,'tablePar.txt');

```



```

Reset(F);
Readln(F,a);
Readln(F,b);
  for j:=1 to a do begin
    for i:=1 to b do begin
      readln(f,n); TableAr[i,j]:=n;
    end;
  end;
CloseFile(F);
k:=1;
while k=1 do //Заполнение 2-х массивов для дальн. интерполяции
begin
  for i:=2 to b do
  begin
    if znachen>TableAr[i-1,jj] then
    if znachen<=TableAr[i,jj] then
    begin
      for m:=1 to 9 do
      begin
        NaydenoAr[m]:=TableAr[i,m];
        NaydenoAr2[m]:=TableAr[i-1,m];
      end;
      k:=2;
    end;
    if znachen>=TableAr[i,jj] then
    if znachen<TableAr[i-1,jj] then

    begin
      for m:=1 to 9 do
      begin
        NaydenoAr[m]:=TableAr[i,m];
        NaydenoAr2[m]:=TableAr[i-1,m];
      end;
      k:=2;
    end;
  end;
end;

if NaydenoAr[jj] > NaydenoAr2[jj] then
  koef:=(znachen-NaydenoAr2[jj])/(NaydenoAr[jj]-NaydenoAr2[jj]);
if NaydenoAr[jj] < NaydenoAr2[jj] then
  koef:=1-(znachen-NaydenoAr[jj])/(NaydenoAr2[jj]-NaydenoAr[jj]);

  for m:=1 to 9 do
  begin
    if NaydenoAr[m] > NaydenoAr2[m] then
      RezultAr[m]:=NaydenoAr2[m]+(NaydenoAr[m] - NaydenoAr2[m])*koef;
    if NaydenoAr[m] < NaydenoAr2[m] then
      RezultAr[m]:=NaydenoAr2[m]-(NaydenoAr2[m] - NaydenoAr[m])*koef;
  end;
end;

procedure DataFileVoda;

```

```

var
  t : TextFile;
  i, j, k, m : integer;
  koef1, Tvoda, n, p : real;

begin
  p:=p_tabl/10;
  if p>=0.05 then if p<0.15then
    AssignFile(t,'tabvoda01.txt');
  if p>=0.15 then if p<0.25then
    AssignFile(t,'tabvoda02.txt');
  if p>=0.25 then if p<0.35then
    AssignFile(t,'tabvoda03.txt');
  if p>=0.35 then if p<0.45then
    AssignFile(t,'tabvoda04.txt');
  if p>=0.45 then if p<0.55then
    AssignFile(t,'tabvoda05.txt');
  if p>=0.55 then if p<1.1then
    AssignFile(t,'tabvoda1.txt');
  if p>=1.1 then if p<1.7 then
    AssignFile(t,'tabvoda1_5.txt');
  if p>=1.7 then if p<2.5then
    AssignFile(t,'tabvoda2.txt');
  if p>=2.5 then if p<3.5then
    AssignFile(t,'tabvoda3.txt');
  if p>=3.5 then if p<4.5then
    AssignFile(t,'tabvoda4.txt');
  if p>=4.5 then if p<5.5then
    AssignFile(t,'tabvoda5.txt');
  if p>=5.5 then if p<6.5then
    AssignFile(t,'tabvoda6.txt');
  if p>=6.5 then if p<7.5then
    AssignFile(t,'tabvoda7.txt');
  if p>=7.5 then if p<8.5then
    AssignFile(t,'tabvoda8.txt');
  if p>=8.5 then if p<9.5then
    AssignFile(t,'tabvoda9.txt');
  if p>=9.5 then if p<10.5then
    AssignFile(t,'tabvoda10.txt');
  if p>=10.5 then if p<11.5then
    AssignFile(t,'tabvoda11.txt');
  if p>=11.5 then if p<12.5then
    AssignFile(t,'tabvoda12.txt');
  if p>=12.5 then if p<13.5then
    AssignFile(t,'tabvoda13.txt');
  if p>=13.5 then if p<14.5then
    AssignFile(t,'tabvoda14.txt');
  if p>=14.5 then if p<15.5then
    AssignFile(t,'tabvoda15.txt');
  Reset(t);
  Readln(t,a);
  Readln(t,b);
  for j:=1 to a do begin

```

```

    for i:=1 to b do begin
        readln(t,n); TableArVoda[i,j]:=n;
    end;
end;
CloseFile(t);
j:=jj;
Tvoda:=t_tabl; k:=1;
while k=1 do //Заполнение 2-х массивов для дальн. интерполяции
begin
    for i:=1 to b do
    begin
        if Tvoda>TableArVoda[i-1,j]then
        if Tvoda<=TableArVoda[i,j] then
        begin
            for m:=1 to 4 do
            begin
                NaydenoAr[m]:=TableArVoda[i,m];
                NaydenoAr2[m]:=TableArVoda[i-1,m];
            end;
            k:=2;
        end;
        if Tvoda<TableArVoda[i-1,j]then
        if Tvoda>=TableArVoda[i,j] then
        begin
            for m:=1 to 4 do
            begin
                NaydenoAr[m]:=TableArVoda[i,m];
                NaydenoAr2[m]:=TableArVoda[i-1,m];
            end;
            k:=2;
        end;
    end;
end;
if NaydenoAr[j] > NaydenoAr2[j] then
    koef1:=(Tvoda-NaydenoAr2[j])/(NaydenoAr[j]-NaydenoAr2[j]);
if NaydenoAr[j] < NaydenoAr2[j] then
    koef1:=1-(Tvoda-NaydenoAr[j])/(NaydenoAr2[j]-NaydenoAr[j]);
for m:=1 to 4 do
begin
    if NaydenoAr[m] > NaydenoAr2[m] then
        RezultArVoda[m]:=NaydenoAr2[m]+(NaydenoAr[m] - NaydenoAr2[m])*koef1;
    if NaydenoAr[m] < NaydenoAr2[m] then
        RezultArVoda[m]:=NaydenoAr2[m]-(NaydenoAr2[m] - NaydenoAr[m])*koef1;
    end;
end;
procedure Data_A_02;
var
    f : TextFile;
    i, j, k,m : integer;
    koef, n : real;
begin
    AssignFile(F,'Data_A_02.txt');
    Reset(F);

```

```

Readln(F,a);
Readln(F,b);
  for j:=1 to a do begin
    for i:=1 to b do begin
      readln(f,n); TableAr[i,j]:=n;
    end;
  end;
CloseFile(F);
k:=1;
while k=1 do //Заполнение 2-х массивов для дальн. интерполяции
begin
  for i:=2 to b do
  begin
    if znachen>TableAr[i-1,jj]then
    if znachen<=TableAr[i,jj] then
    begin
      for m:=1 to 12 do
      begin
        NaydenoAr[m]:=TableAr[i,m];
        NaydenoAr2[m]:=TableAr[i-1,m];
      end;
      k:=2;
    end;
    if znachen>=TableAr[i,jj] then
    if znachen<TableAr[i-1,jj]then
    begin
      for m:=1 to 12 do
      begin
        NaydenoAr[m]:=TableAr[i,m];
        NaydenoAr2[m]:=TableAr[i-1,m];
      end;
      k:=2;
    end;
  end;
end;

if NaydenoAr[jj] > NaydenoAr2[jj] then
  koef:=(znachen-NaydenoAr2[jj])/(NaydenoAr[jj]-NaydenoAr2[jj]);
if NaydenoAr[jj] < NaydenoAr2[jj] then
  koef:=1-(znachen-NaydenoAr[jj])/(NaydenoAr2[jj]-NaydenoAr[jj]);
for m:=1 to 12 do
begin
  if NaydenoAr[m] > NaydenoAr2[m] then
    RezultAr[m]:=NaydenoAr2[m]+(NaydenoAr[m] - NaydenoAr2[m])*koef;
  if NaydenoAr[m] < NaydenoAr2[m] then
    RezultAr[m]:=NaydenoAr2[m]-(NaydenoAr2[m] - NaydenoAr[m])*koef;
end;
end;

procedure Data;
var
  f : TextFile;
  i, j, k,m : integer;

```

```

    koef, n : real;
begin
    AssignFile(F,'Data.txt');
    Reset(F);
    Readln(F,p0);
    Readln(F,p_a);
    Readln(F,t_a);
    Readln(F,gama_as);
    Readln(F,f_as);
    Readln(F,z_as);
    Readln(F,f_a);
    Readln(F,z_a);
    Readln(F,fi_a);
    Readln(F,delta_tg);
    Readln(F,x_a);
    Readln(F,V_a);
    Readln(F,beta_a);
    Readln(F,gama_a);
    Readln(F,W_a);
    Readln(F,M_a);
    Readln(F,A_k);
    Readln(F,d_f);
    CloseFile(F);
end;

procedure DataKzv;
var
    t : TextFile;
    i, j, k, m : integer;
    koef, n : real;

begin
    AssignFile(t,'Kzv.txt');
    Reset(t);
    Readln(t,a);
    Readln(t,b);
    for j:=1 to a do begin
        for i:=1 to b do begin
            readln(t,n); TableAr[i,j]:=n;
        end;
    end;
    CloseFile(t);
    k:=1;
    while k=1 do //Заполнение 2-х массивов для дальн. интерполяции
    begin
        for i:=2 to b do
        begin
            if znachen>TableAr[i-1,jj]then
            if znachen<=TableAr[i,jj] then
            begin
                for m:=1 to 3 do
                begin
                    NaydenoAr[m]:=TableAr[i,m];

```

```

        NaydenoAr2[m]:=TableAr[i-1,m];
    end;
    k:=2;
end;
if znachen>=TableAr[i,jj] then
if znachen<TableAr[i-1,jj]then

begin
    for m:=1 to 3 do
    begin
        NaydenoAr[m]:=TableAr[i,m];
        NaydenoAr2[m]:=TableAr[i-1,m];
    end;
    k:=2;
end;
end;
end;

if NaydenoAr[jj] > NaydenoAr2[jj] then
    koef:=(znachen-NaydenoAr2[jj])/(NaydenoAr[jj]-NaydenoAr2[jj]);
if NaydenoAr[jj] < NaydenoAr2[jj] then
    koef:=1-(znachen-NaydenoAr[jj])/(NaydenoAr2[jj]-NaydenoAr[jj]);

for m:=1 to 3 do
begin
    if NaydenoAr[m] > NaydenoAr2[m] then
        RezultAr[m]:=NaydenoAr2[m]+(NaydenoAr[m] - NaydenoAr2[m])*koef;
    if NaydenoAr[m] < NaydenoAr2[m] then
        RezultAr[m]:=NaydenoAr2[m]-(NaydenoAr2[m] - NaydenoAr[m])*koef;
    end;
end;
end.

```

Приложение Б

Результаты расчета термотрансформатора

Результаты расчета термотрансформатора (к рисунку 1.4)

p_{02}	p_a	U	w_{Π} / w_a
$p_{0a} = 20 \text{ бар}, t_0 = 72^{\circ} \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$			
0,3	0,161	0,0115	0,601
0,4	0,213	0,0221	0,630
0,6	0,321	0,0384	0,685
0,8	0,4305	0,0464	0,732
1,0	0,5365	0,0466	0,775
1,2	0,643	0,0487	0,811
1,4	0,75	0,0457	0,851
1,6	0,8475	0,0458	0,881
1,8	0,9535	0,0470	0,911
2,0	1,052	0,0469	0,940
$p_{0a} = 20 \text{ бар}, t_0 = 73^{\circ} \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$			
0,3	0,161	0,0104	0,596
0,4	0,213	0,0210	0,627
0,6	0,321	0,0371	0,678
0,8	0,4305	0,0451	0,725
1,0	0,5365	0,0454	0,767
1,2	0,643	0,0473	0,802
1,4	0,75	0,0460	0,843
1,6	0,8475	0,0454	0,870
1,8	0,9535	0,0463	0,899
2,0	1,052	0,0463	0,927
$p_{0a} = 20 \text{ бар}, t_0 = 74^{\circ} \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$			
0,3	0,161	0,0092	0,591
0,4	0,213	0,0197	0,622
0,6	0,321	0,0357	0,672
0,8	0,4305	0,0440	0,717
1,0	0,5365	0,0441	0,758
1,2	0,643	0,0460	0,793
1,4	0,75	0,0441	0,831
1,6	0,8475	0,0441	0,859
1,8	0,9535	0,0452	0,888
2,0	1,052	0,0455	0,915

$p_{0a} = 17 \text{ бар}, t_0 = 72^\circ \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$			
0,3	0,161	0,0115	0,601
0,4	0,213	0,0221	0,630
0,6	0,321	0,0384	0,685
0,8	0,4305	0,0464	0,732
1,0	0,5365	0,0466	0,775
1,2	0,643	0,0487	0,811
1,4	0,75	0,0457	0,851
1,6	0,8475	0,0458	0,881
1,8	0,9535	0,0470	0,911
2,0	1,052	0,0469	0,940
$p_{0a} = 25 \text{ бар}, t_0 = 72^\circ \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$			
0,3	0,161	0,0115	0,601
0,4	0,213	0,0221	0,630
0,6	0,321	0,0384	0,685
0,8	0,4305	0,0464	0,732
1,0	0,5365	0,0466	0,775
1,2	0,643	0,0487	0,811
1,4	0,75	0,0457	0,851
1,6	0,8475	0,0458	0,881
1,8	0,9535	0,0470	0,911
2,0	1,052	0,0469	0,940

Результаты расчета термотрансформатора (к рисунку 1.5)

p_{02}	p_a	$\eta_{\text{еСТК}}$	η_e	Ψ_q
$p_{0a} = 20 \text{ бар}, t_0 = 72^\circ \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$				
0,3	0,161	0,354	0,19	1,382
0,4	0,213	0,540	0,26	1,839
0,6	0,321	0,785	0,37	2,638
0,8	0,4305	0,857	0,43	3,089
1,0	0,5365	0,793	0,44	3,131
1,2	0,643	0,769	0,45	3,262
1,4	0,75	0,698	0,44	3,195
1,6	0,8475	0,664	0,45	3,219
1,8	0,9535	0,643	0,46	3,290
2,0	1,052	0,615	0,46	3,306
$p_{0a} = 20 \text{ бар}, t_0 = 73^\circ \text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$				
0,3	0,161	0,295	0,17	1,207
0,4	0,213	0,383	0,21	1,494
0,6	0,321	0,535	0,28	1,988
0,8	0,4305	0,578	0,32	2,263

1,0	0,5365	0,542	0,32	2,299
1,2	0,643	0,529	0,33	2,387
1,4	0,75	0,487	0,33	2,362
1,6	0,8475	0,468	0,33	2,377
1,8	0,9535	0,456	0,34	2,426
2,0	1,052	0,439	0,34	2,441
$p_{0a} = 20 \text{ бар}, t_0 = 74^0\text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}$				
0,3	0,161	0,221	0,16	1,119
0,4	0,213	0,307	0,19	1,328
0,6	0,321	0,417	0,24	1,682
0,8	0,4305	0,449	0,26	1,879
1,0	0,5365	0,424	0,27	1,909
1,2	0,643	0,416	0,28	1,975
1,412	0,75	0,374	0,28	1,956
1,6	0,8475	0,374	0,28	1,975
1,8	0,9535	0,366	0,28	2,012
2,0	1,052	0,354	0,29	2,026

Результаты расчета термотрансформатора (к рисунку 1.6)

$t_4 = 60^0\text{C}, p_{02} = 1 \text{ бар}, M_3 = 0,75, p_4 = 8,88 \text{ бар}, p_{0a} = 15 \text{ бар}$			
$t_0, ^0\text{C}$	η_e	$\eta_{\text{еСТК}}$	Ψ_q
62	0,350	0,679	2,975
63	0,265	0,472	2,233
64	0,223	0,373	1,878
$t_4 = 70^0\text{C}, p_{02} = 1 \text{ бар}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26 \text{ бар}, p_{0a} = 20 \text{ бар}$			
72	0,435	0,793	3,131
73	0,322	0,542	2,300
74	0,269	0,424	1,909
$t_4 = 80^0\text{C}, p_{02} = 1 \text{ бар}, M_3 = 0,85, p_4 = 14,08 \text{ бар}, p_{0a} = 25 \text{ бар}$			
82	0,534	0,933	3,357
83	0,381	0,613	2,365
84	0,310	0,468	1,917
$t_4 = 90^0\text{C}, p_{02} = 1 \text{ бар}, M_3 = 0,88, p_4 = 17,42 \text{ бар}, p_{0a} = 30 \text{ бар}$			
92	0,445	0,710	2,530
93	0,332	0,484	1,864
94	0,282	0,386	1,576

Результаты расчета термотрансформатора (к рисунку 1.7)

p_{02}	p_a	η_e
$t_4 = 70^0\text{C}, t_0 = 72^0\text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26\text{бар}, p_{0a} = 20\text{бар}, \varphi_a = 0,95$		
0,3	0,161	-
0,4	0,213	0,148
0,6	0,321	0,237
0,8	0,4305	0,286
1,0	0,5365	0,288
1,2	0,643	0,302
1,4	0,75	
1,6	0,8475	0,292
1,8	0,9535	0,299
$t_4 = 70^0\text{C}, t_0 = 72^0\text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26\text{бар}, p_{0a} = 20\text{бар}, \varphi_a = 0,96$		
0,3	0,161	0,144
0,4	0,213	0,201
0,6	0,321	0,300
0,8	0,4305	0,356
1,0	0,5365	0,360
1,2	0,643	0,376
1,4	0,75	0,366
1,6	0,8475	0,368
1,8	0,9535	0,377
$t_4 = 70^0\text{C}, t_0 = 72^0\text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26\text{бар}, p_{0a} = 20\text{бар}, \varphi_a = 0,97$		
0,3	0,161	0,19
0,4	0,213	0,26
0,6	0,321	0,37
0,8	0,4305	0,43
1,0	0,5365	0,44
1,2	0,643	0,45
1,4	0,75	0,44
1,6	0,8475	0,45
1,8	0,9535	0,46
$t_4 = 70^0\text{C}, t_0 = 72^0\text{C}, M_3 = 0,63, p_4 = 11,26\text{бар}, p_{0a} = 20\text{бар}, \varphi_a = 0,98$		
0,3	0,161	0,244
0,4	0,213	0,315
0,6	0,321	0,438
0,8	0,4305	0,507
1,0	0,5365	0,515
1,2	0,643	0,535
1,4	0,75	0,527
1,6	0,8475	0,531
1,8	0,9535	0,542

$t_4 = 70^0\text{C}$, $t_0 = 72^0\text{C}$, $M_3 = 0,63$, $p_4 = 11,26\text{ap}$, $p_{0a} = 20\text{ap}$, $\varphi_a = 0,99$		
0,3	0,161	0,30
0,4	0,213	0,38
0,6	0,321	0,51
0,8	0,4305	0,59
1,0	0,5365	0,60
1,2	0,643	0,62
1,4	0,75	0,61
1,6	0,8475	0,62
1,8	0,9535	0,63